

Vortex Screen장치를 이용한 강우유출수내 미세입자 처리특성 분석

이준호[†] · 정윤희 · 방기웅*

충주대학교 환경공학부 · *한밭대학교 토목 · 환경 · 도시공학부

(2009년 4월 16일 접수, 2009년 4월 24일 채택)

Performance Evaluation of Vortex Screen for Treatment of Fine Particles in Storm Runoff

Jun-ho Lee[†] · Yun-Hee Jung · Ki-wong Bang*

Department of Environmental Engineering, Chungju National University

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

ABSTRACT : The use of hydrodynamic separator is becoming increasingly popular for suspended solids reduction in urban storm runoff. This study is a laboratory investigation of the use of Vortex Screen to reduce the solids concentration of synthesized storm runoff. The synthesized storm runoff was made with water and addition of particles; manhole sediment, road sediment, fly ash, and polyvinyl chloride powder. Vortex Screen was made of acryl resin with 250 mm of diameter and height of 700 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 samples were taken simultaneously at the influent storage tank and effluent tank, and measured SS and COD concentrations. The ranges of surface loading rate were 110 to 1,550 m³/m²/day, and influent SS concentrations were varied from 141 to 1,986 mg/L. This paper was intended to evaluate the effect of inlet baffle and the ratio of underflow to overflow (Q_u/Q_o) on particle separation efficiency for various particle size using Vortex Screen. It was found that when increase of Q_u/Q_o from 10% to 20%, SS removal efficiency was increased about 6%. The range of SS and COD removal efficiencies of road sediment particle size 125<d_p<300 μm were 68.0~81.0%, 53.1~71.9%, respectively. Results showed that SS removal efficiency with inlet baffle improved by about 10~20% compared without inlet baffle.

Key Words : Vortex Screen, Storm Runoff, Fine Particle, Inlet Baffle

요약 : 도시지역 비점오염부하를 저감하는 장치 중에서 수리동력학적 분리장치(HDS)는 가장 많이 이용되고 있다. 본 연구에서는 HDS장치 유형 중에서 Vortex Screen 장치를 실험실 규모로 개발 및 제작하여 강우유출수 처리특성을 분석하였다. 강우유출수내 입자물질을 모의하기 위하여 실험에 사용한 시료는 합류식 하수관거의 맨홀 바닥 퇴적물질, 도로변 측구의 퇴적물질, 소각장 fly ash, polyvinyl chloride (PVC)분말 등의 시료를 대상으로 하였다. 유입유량의 변화를 주었을 때 처리장치 본체에서 약 2분이 경과한 후 안정된 상태에서 유입수와 유출수 시료를 동시에 채수하였다. 수면적부하율은 110~1,550 m³/m²·day의 범위로 운전하였으며, 유입수 SS농도의 범위는 141~1,986 mg/L로 하였다. Vortex Screen을 이용하여 다양한 입경과 밀도를 가진 입자들을 대상으로 수면적부하율과 하부배출유량비를 운전조건으로 하여 처리특성을 분석한 결과 제거효율에 영향을 주는 인자 중, 월류유량에 대한 하부배출유량 비율(Q_u/Q_o), Q_u/Q_o값이 10%에서 20% 증가 시 SS 제거효율은 6% 증가하는 특성을 나타내었다. 도시지역의 대표적인 입경을 가진 퇴적물질 125<d_p<300 μm를 대상으로 처리능을 분석한 결과 SS, COD 제거효율 범위는 각각 68.0~81.0%, 53.1~71.9%를 나타내었다. 수면적 부하율이 증가함에 따라 처리효율은 유입부 유도판을 설치한 경우가 설치하지 않은 경우보다 10~20% 향상되는 것으로 분석되었다.

주제어 : 볼텍스 스크린, 강우 유출수, 미세입자, 유입부 유도판

1. 서론

최근 비점오염원에 대한 중요성과 문제점을 인식하고 다양한 저감방안을 모색하는 연구들이 다양하게 진행되고 있다. 비점오염원 중에서 특히 강우유출수는 유기물질, 부유물질, 자동차 배기가스 침착물질, 타이어 마모물질, 기름, 윤활유, 방향족 탄화수소화합물질, 중금속 등 다종 다

량의 유해물질을 함유하고 있다.^{1,2)} 강우 유출수는 대표적인 비점오염원으로서 불규칙한 발생, 많은 종류의 유해물질의 함유, 극단적인 유량 변동 폭 등으로 기존 하수처리 공법으로는 처리가 불가능하다. 특히 도시지역에서 초기강우(first flush) 시 부유물질의 농도는 건기 시 하수농도에 비교하여 5~100배 높은 것으로 보고되었다.^{3,4)} 점오염원은 하수관로에 차집되어 하·폐수처리장에서 처리되지만 비점오염원은 주로 강우 시 합류식 또는 분류식 우수관을 통하여 미처리 상태로 하천으로 배출되는데, 특히 초기강

[†] Corresponding author
E-mail: jlee@chnu.ac.kr
Tel: 043-841-5723

Fax: 043-841-5351

우 시에는 극단적으로 많은 오염부하로 인하여 도시하천의 주된 오염원이다.^{1,5)} 전술한 바와 같이, 도시지역 비점 오염부하는 시간에 따른 유량 변동 폭이 극단적으로 크고 짧은 시간동안에 대량으로 배출하는 특성을 가지는데 이러한 특성을 가진 비점오염을 제어하는 최적관리방안(best management practices, BMPs)중에서 수리동력학적 분리장치(hydrodynamic separator, 이하 HDS)는 가장 효과적인 기술임을 국외 여러 연구사례들을 통하여 입증되었다.^{6~11)} HDS 장치는 수면적부하율이 매우 높으며, 구동부분이 없고, 운전 및 유지관리비가 적게 소요되므로⁸⁾ 비점오염처리 기술로 많은 연구자들에 의해 제시되고 있다.

HDS 장치는 300 μm 이상의 비교적 큰 입경을 가지고 모래와 같이 비중이 큰 입자들에 대해서는 처리효율이 높지만, 강우유출수 입경은 대부분이 100 μm 이하의 미세입자로 구성되어 높은 수면적부하율 조건에서는 입자제거효율에 한계가 있다. 도시지역 강우유출수의 경우 입경 범위가 주로 100~150 μm 로 유기물질, 중금속, 기름성분들을 쉽게 흡착/부착하여 유사거동을 하므로 미세입자의 제거는 유기오염물질, 중금속, 기름성분 등과 같은 기타 오염물질 제거효과가 있다.¹²⁾ 최근 개발되고 있는 HDS 장치는 스크린과 여재 등의 조합을 통하여 미세입자의 제거효율을 높이고자 시도하고 있다.^{14~16)} 본 연구에서는 HDS 장치중에서 구조를 변형시킨 Vortex Screen장치를 이용하여 강우유출수내 미세입자물질들의 제거특성을 분석하였다. Vortex Screen장치 유입부의 구조를 변경하여 선회류(vortex)를 향상시켜 입자물질들을 빠르게 침전할 수 있도록 유입부 유도판(inlet baffle)를 두었고, 조대물질의 제거를 위해 basket screen를 유입부 하단에 두었으며, 하부에 퇴적된 입자들이 재부상하지 않도록 baffle cone과 sediment sump를 두었다. 다양한 입경범위 및 비중이 다른 미세입자들을 Vortex Screen장치에 적용하여 수면적부하율 변동과 하부배출유량비에 따른 처리특성을 분석하여 운전조건별 처리특성을 파악함이 본 연구의 목적이다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. Vortex Screen 장치의 구성

Vortex Screen장치의 구조는 Fig. 1과 같이 투명 아크릴로 제작하였으며 내경 25 cm, 높이 70 cm, 총 용적은 35 L이고 하부 바닥은 원추형으로 밸브를 부착하여 하부배출유량(underflow, Q_u)을 조절할 수 있도록 하였다. 유입유량은 실린더 형태의 내통을 통하여 접선방향으로 조내에 유입되면 유입부 유도판(inlet baffle)에 의해 조내벽 주변으로 유도되어 발생하는 강한 회전류(vortex)에 의한 원심력과 중력에 의해 침전되어 basket screen에서 조대입자물질이 제거되고, 미세입자들은 sediment sump에 퇴적되도록 하였다. Sediment sump에 퇴적된 입자물질들의 재부상 현상을 저감시키기 위해 sediment cone과 상단과 하단에 baffle cone을 설치하였다. 비중이 가벼운 부상물질들은 부상물질 trap으로 회수할 수 있도록 하였다. 강우유출량이 증가하여 처리용량 이상으로 유입 시에는 내통의 상단에 월류웨어를 통하여 유출(Q_o)되도록 구성하였다. 유출부의 높이는 유입부와 동일한 수위로 유출되도록 하였으며 월류웨어를 통해 배출된다.

Fig. 2는 Vortex Screen장치 운전을 위한 처리장치의 구성도이다. 장치는 유입수 2 m³ 용량의 유입수 저류조, 교반기, 유량조절 가변기를 장착한 유입수 2 hp 주입펌프, 유입수 바이패스 밸브, 초음파 관유량계, 입자주입 정량펌프, 입자주입저류조, Vortex Screen본체, 그리고 유출유량과 하부배출유량 저류조, 유출유량 저류조 반송펌프, 배관, 밸브 등으로 구성하였다. 유입저류조의 물을 유입펌프에 의해 유입되면 유입관로 상에 연결된 관을 통해 정량펌프를 이용하여 슬러리 상태의 고형물질을 일정량으로 주입하여 Vortex Screen 본체로 혼합되어 유입되며, 본체에 유입되기 전에 유입관로 하단에 밸브를 설치하여 유입수 시료를 채수할 수 있도록 하였다. Vortex Screen 본체에 설치한 유입부 유도판은 부착과 탈착이 가능하도록 하였으며, 하부배출유량은 밸브를 이용하여 조절하였다.

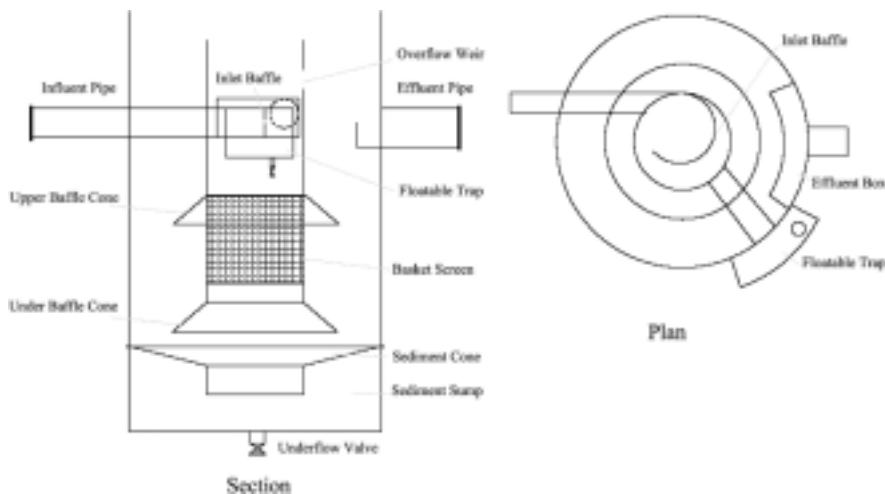


Fig. 1. The structure of vortex screen device.

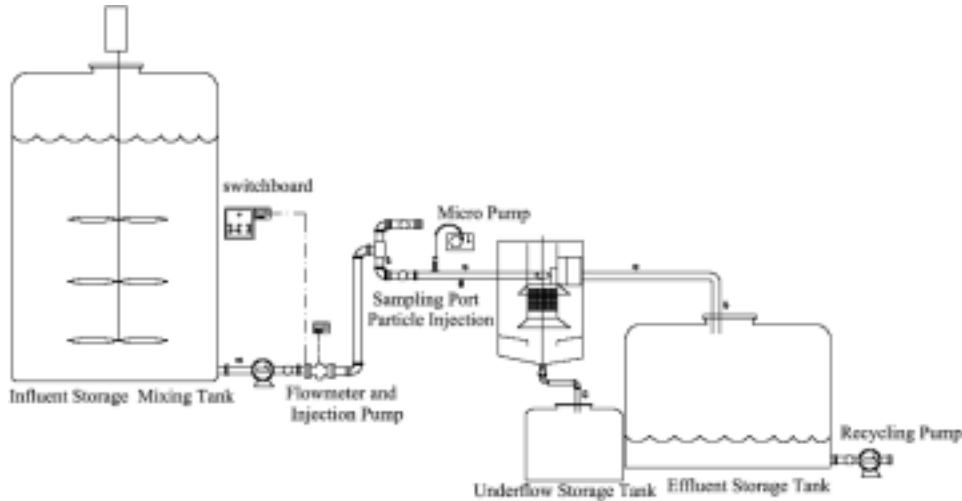


Fig. 2. Schematic diagram of the Vortex Screen system.

Table 1. Physical characteristics of injected particles

Materials	Density(g/cm ³)	Range of particle size, d _p (μm)
Manhole sediment	2.1 ~ 2.3	d _p < 150 μm
Road sediment	2.2 ~ 2.5	300 < d _p < 500 μm, 125 < d _p < 300 μm, d _p < 125 μm
Fly ash	1.8	d _p < 120 μm
Polyvinyl chloride	1.2	d _p < 80 μm

2.2. 재료 및 실험방법

강우유출수내 입자물질을 모의하기 위하여 실험에 사용한 시료는 합류식 하수관거의 맨홀 바닥 퇴적물질, 도로변 측구에 퇴적물질, 소각장 fly ash, polyvinyl chloride (PVC) 분말 등의 시료를 대상으로 하였다. 퇴적물질들은 건조기에서 90℃로 24시간 건조 후 체분리하여 입경별로 분류하여 사용하였다. PVC분말입자는 상업용으로 판매되는 시약으로 입경은 80 μm 크기이다. 처리장치로 유입시키기 전에 수돗물에 일정량 혼합하여 슬러리 상태를 유지시켜 Vortex Screen장치에 주입하였다. 분석에 사용한 입자물질들의 입경범위, 밀도, 체분리된 입경 등 물리적 특성을 Table 1에 나타내었다.

Vortex Screen장치에 운전인자는 유입부 유도관 부착유무, 수면적부하율의 변화와 유출되는 월류유량(Q_o)에 대한 하부배출유량(Q_u)의 비율(Q_o/Q_u) 등이다. 시료의 채수는 유입유량의 변화를 주었을 때 처리장치 본체에서 약 2분이 경과한 후 안정된 상태에서 유입수와 유출수 시료를 동시에 채수하였다. 수면적부하율은 110~1,550 m³/m²·day의 범위로 운전하였으며, 유입수 SS농도의 범위는 141~1,986 mg/L로 하였다. 채수한 시료에 대해 수질분석 항목은 GF/C여지에 의한 여과 후 건조 전·후 무게를 측정하여 SS를 분석하였고, 환류냉각 및 중크롬산칼륨법에 의한 COD를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

Vortex Screen 장치에 의한 강우유출수내 오염물질 제거 특성을 평가하기 위한 처리효율 E(%) 산정은 식 (1)과 같이 유량가중평균(EMC) 농도를 기준으로 하였다.

$$E(\%) = \frac{S_I V_I - S_O V_I}{S_I V_I} \times 100\% = \frac{M_I - M_O}{M_I} \times 100\% \quad (1)$$

여기서, S_I와 S_O는 각각 유입수, 유출수 농도(mg/L), V_I, V_O는 각각 유입량과 유출량(m³/day), M_I, M_O는 각각 유입, 유출된 오염물질량(kg/day)이다.

3.1. 하부배출유량변화에 따른 처리특성

Vortex Screen장치에 의한 오염물질 제거효율에 영향을 주는 인자 중의 하나로서 월류유량에 대한 하부배출유량 비율(Q_u/Q_o)이다. Field 등⁷⁾은 HDS유형의 처리장치에서 적합한 회전류를 주기 위한 Q_u/Q_o백분율을 6~10%을 제안하였으며 Paul 등¹⁶⁾은 10~25%를 제안하였다. 입경이 150 μm 이하의 합류식하수관 맨홀 퇴적물질을 대상으로 하부배출유량비율을 0%에서 30%까지 10% 간격으로 변화를 주어 수면적부하율 변화에 대한 오염물질 제거효율 특성을 분석하였다. Table 2에는 수면적부하율, 하부배출유량 비율의 변화에 대한 SS와 COD 제거효율을 요약하였다. 수면적부하율을 121~1,525 m³/m²·day의 운전조건에서 하부배출유량 비율 변화에 대한 SS, COD 평균제거효율 범위는 각각 49.8~61.5%, 44.6~59.8%로 나타났다. Fig. 3은 하부배출유량 비율과 수면적부하율 변화에 따른 오염물질 제거효율을 나타낸 것이다. Fig. 4는 하부배출유량 비율의 변화에 따른 SS제거효율을 나타내 것으로 평균제거효율을 기준으로 하부배출유량비율이 높을수록 제거효율은 높게 나타나며 10%에서 20% 증가 시 처리효율은 6% 증가하는 경향을 보여주고 있다. 본 연구에서는 Vortex Screen 장치의 하부배출유량 비율이 10% 증가할 경우 처리효율은 약 4% 향상되는 것으로 분석되었다.

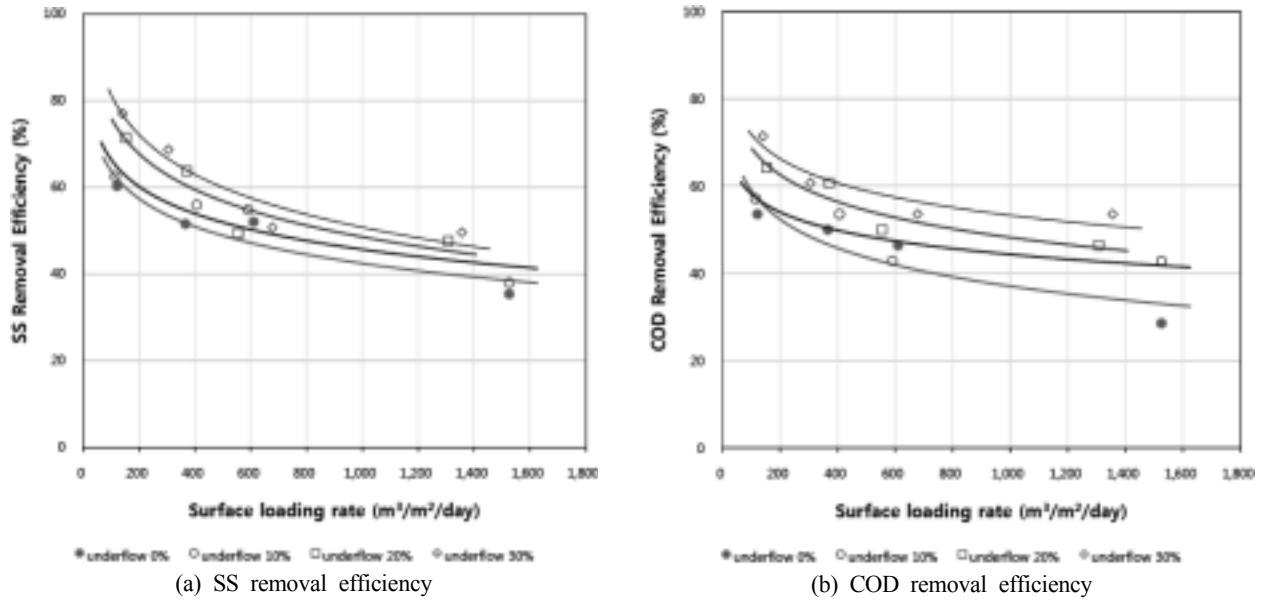


Fig. 3. The relationship between surface loading rate and removal efficiency for combined sewer manhole sediment.

Table 2. Pollutant removal efficiency ranges according to ratio of underflow to overflow

Items	Surface loading rate (m ³ /m ² · day)				SS removal efficiency E _(SS) (%)				COD removal efficiency E _(COD) (%)			
	0%	10%	20%	30%	0%	10%	20%	30%	0%	10%	20%	30%
Minimum	121	114	153	141	35.4	38.0	47.6	49.6	28.6	42.9	46.4	53.6
Maximum	1,525	1,525	1,308	1,356	60.3	62.5	71.5	77.0	53.6	57.1	64.3	71.4
Mean	656	659	596	620	49.8	52.8	58.1	61.5	44.6	49.1	55.4	59.8

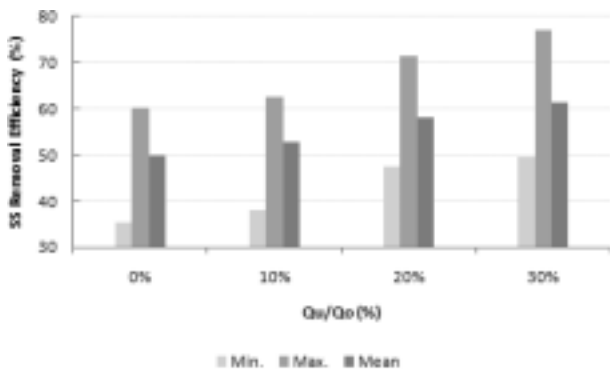


Fig. 4. The relationship between the ratio of Q_u/Q_o and SS removal efficiency.

3.2. 유입부 유도판 설치 유무에 따른 처리특성

유입부 구조는 HDS유형 처리장치의 처리효율에 영향을 주는 주요한 설계인자이다. Keshavarzi 등¹⁷⁾은 유입부 상단

에 반원형 유도판(deflector)을 설치하여 회전류를 높여 처리효율을 향상시켰다. Olson 등¹⁸⁾은 hydrocyclone 유입관의 형상을 전산유체역학(CFD)에 의한 모의 기법을 통해 최적 조건의 형상을 제시하였으며, Pandit 등¹⁹⁾은 유입관을 10°로 경사를 두어 유입시켰다. 이외에도 많은 연구자들이 유입부에서 입자에 회전류를 증대시켜 처리효율을 향상시키고자 하였다. 본 연구에서는 반 원형의 유도판(inlet baffle)을 유입부에 설치하여 조에 직각으로 유입되는 유입수의 회전반경을 축소시켜 회전류를 증가시켰다. Vortex Screen 장치에 유도판을 부착한 경우와 부착하지 않았을 경우에서 수면적 부하율, 하부배출유량 변화에 따른 SS처리효율을 Table 3에 정리하였다. 유도판을 설치하지 않은 조건에서 fly ash (SG 1.8, $d_p < 120 \mu m$)를 유입수로 하여 하부배출유량비를 0%, 20%로 구분하여 실험한 결과 20%의 하부배출유량비로 운전한 경우가 Fig. 5에서와 같이 약 10% 처리효율이 높게 나타났다. 또한, 낮은 수면적부하율 운

Table 3. Removal efficiency of SS for fly ash and PVC powder as a function of surface loading rate and baffle

Items	Surface loading rate		Without Baffle		Surface loading rate		Without Baffle		Surface loading rate		With Baffle	
	(m ³ /m ² · day)		Fly ash		(m ³ /m ² · day)		PVC+Fly ash		(m ³ /m ² · day)		PVC+fly ash	
QU/QO(%)	0%	20%	0%	20%	0%	20%	0%	20%	0%	20%	0%	20%
Minimum	115	161	40.2	37.6	132	138	26.5	19.5	160	158	51.6	46.8
Maximum	1,419	1,222	82.0	67.8	1,479	1,333	84.6	66.4	1,173	1,467	78.5	84.5
Mean	542	564	61.5	50.2	733	632	56.8	45.7	593	745	65.4	65.3

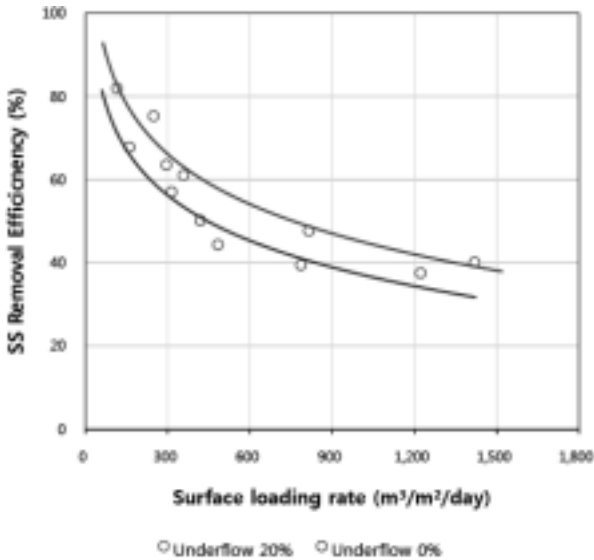


Fig. 5. The relationship between surface loading rate and removal efficiency of SS for fly ash without inlet baffle.

전조건과 높은 수면적부하율의 조건에서 일정하게 처리 효율의 차이를 보여주고 있다. Fly ash와 PVC분말(SG 1.2, $d_p < 80 \mu\text{m}$)을 혼합하여 유입수로 하고, 유도판 부착 유무, 하부배출유량비 변화 및 수면적부하율에 대한 SS제거효율을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)에서와 같이 하부배출유량비를 0%로 운전한 경우, 수면적 부하율이 증가함에 따라 처리효율은 유도판을 설치한 경우가 설치하지 않은 경우보다 6~25%로 높아지는 것으로 나타났다. 수면적부하율이 증가함에 따라 처리효율의 차이는 크게 나타나며, 낮은 수면적부하율 조건에서도 처리효율의 차이를 나타내었다. Fig. 6(b)에서와 같이 하부배출유량비를 20%로 했을 경우는 낮은 수면적부하율 조건에서는 처리효율이 유사하지만 1,500 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 의 높은 조건에서는 유도판을 설치한 경우 SS제거효율은 20% 향상되는 것으로 나타났다. Bergstrom 등²⁰⁾은 HDS유형의 처리장치에서 입자분리효율에서 회전속도(radial velocity, v)가 가장 중요한 성분임을 지적하였다. 입자의 분리에 기여하는 회전유체내 침전속도, v_o 는 식 (2)와 같이 입경에 영향을 크게 받는다.²¹⁾ 또한 입자의 밀도와 유입지점의 실린더 부분의 반지름, r 에 반비례관계를 가지는데 이는 입자의 분리효율은 원심가속도, $v\theta^2/r$ 에 비례하여 증가함을 의미한다. Vortex Screen 장치에서 유입수는 본체의 내통으로 유입시켜 원심력을 유도함에 있어 유입부 유도판을 부착하여 원심가속도를 증가시킴으로서 처리효율이 향상된 것으로 분석된다.

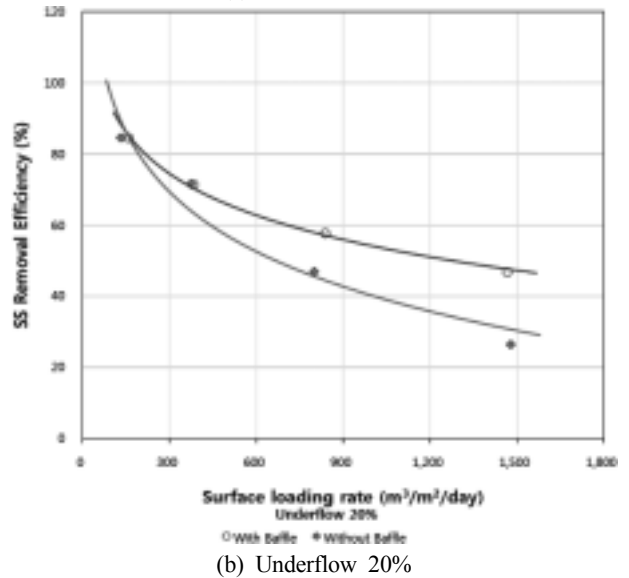
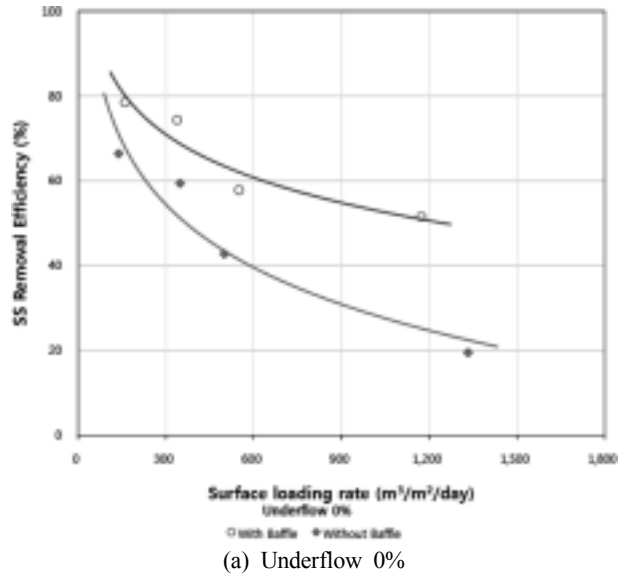


Fig. 6. Effect of inlet baffle on SS removal efficiency for Vortex Screen.

$$v_o = \frac{d_p^2(\rho_p - \rho_w)}{18\mu} \left(\frac{v\theta^2}{r} \right) \quad (2)$$

3.3. 입경별 수면적부하율 변화에 따른 처리특성

도로퇴적물질을 건식으로 체(sieve)분리하여 입경범위를 $300 < d_p < 500 \mu\text{m}$, $125 < d_p < 300 \mu\text{m}$, $d_p < 125 \mu\text{m}$ 의 3단계로 나누어 Vortex Screen 장치에서의 처리능을 분석하였다. 하부배출유량은 0%, 유도판을 부착한 조건으로 운전하였다.

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

Items	Surface loading rate ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day}$)			SS removal efficiency ESS(%)			COD removal efficiency ESS(%)		
	$300 < d_p < 500 \mu\text{m}$	$125 < d_p < 300 \mu\text{m}$	$d_p < 125 \mu\text{m}$	$300 < d_p < 500 \mu\text{m}$	$125 < d_p < 300 \mu\text{m}$	$d_p < 125 \mu\text{m}$	$300 < d_p < 500 \mu\text{m}$	$125 < d_p < 300 \mu\text{m}$	$d_p < 125 \mu\text{m}$
Minimum	102	96	102	83.6	68.0	48.3	68.6	53.1	38.5
Maximum	1,525	1,408	1,525	89.8	81.0	77.2	81.0	71.9	69.2
Mean	479	501	476	86.1	75.6	64.1	74.7	63.8	52.2

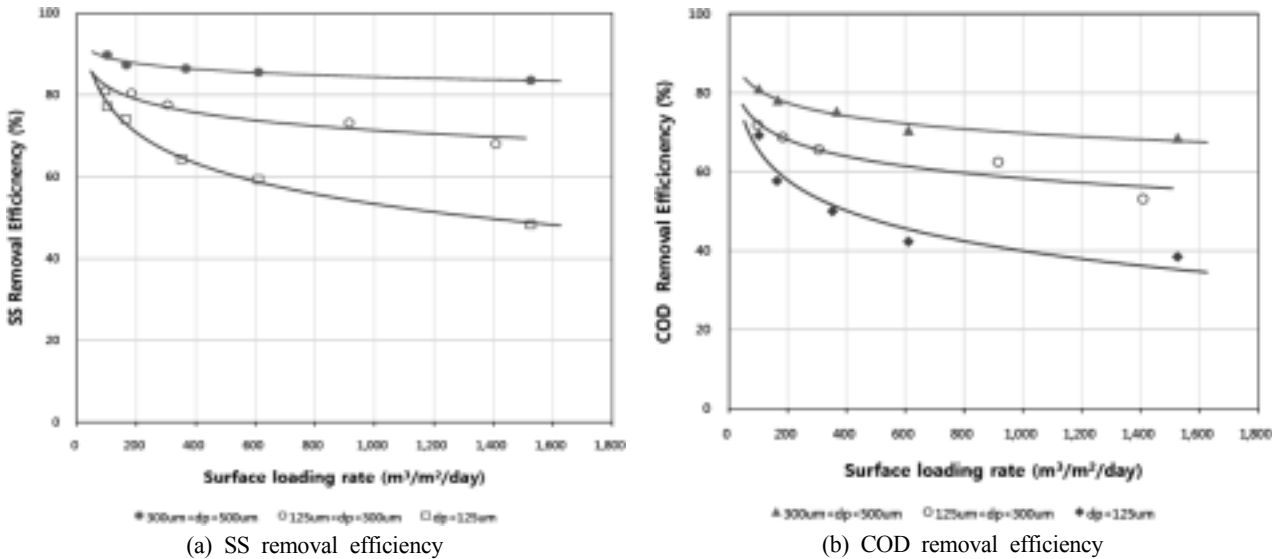


Fig. 7. The relationship between surface loading rate and removal efficiency for various particle size.

입경분포별 수면적부하율에 따른 SS, COD 제거범위를 Table 4에 정리하였다. 입경범위가 가장 큰 $300 < d_p < 500 \mu m$ 의 경우, 수면적부하율을 $102 \sim 1,525 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 의 운전조건에서 SS, COD 제거효율 범위는 각각 83.6~89.8%(평균, 86.1%), 68.6~81.0%(평균 74.7%)를 나타내었다. 입경범위 $125 < d_p < 300 \mu m$ 의 경우에는 수면적부하율을 $96 \sim 1,408 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 의 운전조건에서 SS, COD 제거효율 범위는 각각 68.0~81.0%(평균 75.6%), 53.1~71.9%(평균 63.8%)를 나타내었다. 입경범위가 가장 작은 $d_p < 125 \mu m$ 의 경우 수면적부하율을 $102 \sim 1,525 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 의 운전조건에서 SS, COD 제거효율 범위는 각각 48.3~77.2%(평균 64.1%), 38.5~69.2%(평균 52.2%)를 나타내어 동일한 비중을 가진 입자의 경우 입경이 클수록 처리효율은 증가하는 경향을 나타내었다.

4. 결론

강우유출수내 미세입자물질을 저감하기 위한 방안으로 Vortex Screen을 이용하여 다양한 입경과 밀도를 가진 입자들을 대상으로 수면적부하율과 하부배출유량비를 운전조건으로 하여 유입유도판에 의한 처리특성을 분석하기 위한 실험 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다. Vortex Screen 장치에 의한 오염물질 제거효율에 영향을 주는 인자 중 월류유량에 대한 하부배출유량 비율(Q_U/Q_O)로서, Q_U/Q_O 값이 10%에서 20% 증가 시 SS 제거효율은 6% 증가하는 특성을 나타내었다. Vortex Screen장치에서 유입수는 본체의 내통으로 유입시켜 원심력을 증대시키고, 유입부 유도판을 부착하여 원심가속도를 증가시켜 입자분리효율을 10% 이상 향상시킬 수 있었다. 또한, 수면적 부하율이 증가함에 따라 SS제거효율은 유도판을 설치한 경우가 설치하지 않은 경우보다 20% 이상 향상되는 것으로 분석되었는데, 유도판이 입자의 분리에 기여하는 원심가속도를 증가시키기 때문으로 분석된다. 동일한 비중을 가진 입자의 경우 장치

의 분리효율은 입경에 비례하는 경향을 나타내었다.

사 사

이 논문은 2007년도 충주대학교 대학구조개혁지원사업비(교육인적자원부 지원)의 지원을 받아 수행한 연구임.

참고문헌

- Bertrand, J. L., Chebbo, G., and Saget, A., "Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon," *Water Res.*, **32**(8), 2341~2356(1998).
- Lee, J. H. and Bang, K. W., "Characterization of urban stormwater runoff," *Water Res.*, **34**(6), 1773~1780(2000).
- 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., Yu, M. J., "First flush analysis of urban storm runoff," *Sci. Total Environ.*, **293**, 163~175(2002).
- Deletic, A. and Maksumovic, C. T., "Evaluation of water quality factors in storm runoff from paved areas," *J. Environ. Eng.*, **124**(9), 869~79(1998).
- Brombach, H., Xanthopoulos, C., Hahn, H. H., Pisano, W. C., "Experience with vortex separators for combined sewer overflow control," *Water Sci. Technol.*, **27**(5), 93~104(1993).
- Field, R., O'Connor, T. P., "Swirl technology : Enhancement of design, evaluation, and application," *J. Env. Eng.*, **122**(8), 741~748(1996).
- Andoh, R. Y. G., Saul, A. J., "The use of hydrody-

- dynamic vortex separators and screening systems to improve water quality,” *Sewer Processes and Networks*, Paris, France, pp. 219~229(2002).
9. Lee, J. H., Bang, K. W., Choe, J. S., Ketchum, L. H., and Cho, Y., “The vortex concentrator for suspended solids treatment,” *Water Environ. Technol.*, **47**(9), 335~341(2003).
 10. CDS Tech, <http://www.cdstech.com>(2009).
 11. Downstream Defender, <http://www.hydro-international.biz> (2009).
 12. 조용진, 이준호, 방기웅, 최창수, “강우시 교량도로 유출수 수질 및 입경분포,” *대한환경공학회지*, **29**(12), 1353~1359(2007).
 13. Lee, J. H., Bang, K. W., Choe, J. S., Joh, S. J., “The hydrodynamic filter separator for removal of urban runoff,” *Water Sci. Technol.*, **53**(7), 243~252(2006).
 14. StormFilter, www.stormwater360.com(2009).
 15. Up-Flow Filter, <http://www.hydrointernational.biz>(2009).
 16. Paul, T. C., Sayal, S. K., Sakhuja, V. S., Dhillon, G. S., “Vortex settling basin design consideration,” *J. Hydraulic*, **117**(2), 172~189(1989).
 17. Keshavarzi, A. R., Gheisi, A. R., “Trap efficiency of vortex settling chamber for exclusion of fine suspended sediment particles in irrigation canals,” *Irrig. and Drain.*, **55**, 419~434(2006).
 18. Olson, T. J., Ommen, R. V., “Optimizing hydrocyclone design using advanced CFD model,” *Miner. Eng.*, **17**, 713~720(2004).
 19. 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).
 20. Bergstrom, J., Vomhoff, H., “Experimental hydrocyclone flow field studies,” *Sepa. Puri. Technol.*, **53**, 8~20(2007).
 21. Neru, R. K. R., Yoshida, H., “Comparison of separation performance between single and two inlets hydrocyclones,” *Advan. Power Technol.*, in press(2008).