

합류식 하수관거 월류수 처리를 위한 와류형 분리장치의 최적 운전조건 Optimal Operating Condition of Vortex Separator for Combined Sewer Overflows Treatment

한정균 · 주재영 · 이범준 · 나지훈 · 박철휘*

Han, Jung-kyun · Joo, Jae-young · Lee, Bum-joon · Na, Ji-hun, Park · Chul-hwi *

서울시립대학교 환경공학부

(2008년4월14일 접수, 2009년 3월16일 수정, 2009년 10월5일 채택)

Abstract

A combined sewer system can quickly drain both storm water and sewage, improve the living environment and resolve flood measures. A combined sewer system is much superior to separate sewer system in reduction of the non-point source pollutant load. However, during rainfall, it is impossible in time, space and economic terms to cope with the entire volume of storm water. A sewage system that exceeds the capacity of the sewer facilities drain into the river mixed with storm-water.

In addition, high concentration of CSOs by first-flush increase pollution load and reduce treatment efficiency in sewage treatment plant.

The aim of this study was to develop a processing unit for the removal of high CSOs concentrations in relation to water quality during rainfall events in a combined sewer. The most suitable operational design for processing facilities under various conditions was also determined.

With a designed discharge of 19.89 m³/min, the removal efficiency was good, without excessive overflow, but it was less effective in relation to underflow, and decreased with decreasing particle size and specific gravity.

It was necessary to lessen radius of vortex separator for increasing inlet velocity in optimum range for efficient performance, and removal efficiency was considered to high because of rotation increases through enlargement of comparing height of vortex separator in diameter. By distribution of influent particle size, the actual turbulent flow and experimental results was a little different from the theoretical removal efficiency due to turbulent effect in device.

Key words : First flush, Combined Sewer Overflows, Nonpoint-source, Intensity of rainfall, Vortex separator, Stormwater sedimentation basin, 와류형 분리장치, 우수체수지, 비점오염원, 합류식하수관거 월류수,

주제어 : 초기우수, 합류식하수관거월류수, 와류형분리장치

* Corresponding author Tel:+82-2-2210-2176, Fax:+82-2-, E-mail: chpark@uos.ac.kr(Park, C.)

1. 서론

최근까지는 선진국에서 점오염원의 처리에 주안점을 두고 정책을 추진하였으나, 20세기 중반이후 토지이용의 고도화에 따른 비점오염원의 증가로 인하여 점오염원 정화만으로는 수질목표 달성에 어려움이 있다는 사실이 인식되기 시작하였다. 또한, 합류식 하수관거로부터의 월류수(Combined Sewer Overflows, CSOs)가 하천이나 호수로 유입되면 이들의 수질기준을 적절히 유지시킬 수 없어 하천생태계를 위협하는 또 하나의 문제로 대두되고 있다. 국내에서는 합류식 하수관거 월류수 및 초기우수 등 오염에 대한 저감방안이 요구되고 있으나, CSOs 및 초기우수에 유출특성 및 처리시설에 대한 연구와 기초 자료가 부족한 실정이다(방기웅, 2001).

CSOs 처리방안으로 발생원제어, 차집용량의 확대, 하수관내 유량제어, 분류식하수관거의 사용, 저류시설의 설치, 실시간 제어방법, 스웰조절조, 화학적 살균 등이 있다. Heinking (1985) 등은 효과적인 처리의 방법으로 소유역별 말단 지점에 우수체수지를 설치하고, 저류용량 이상의 유출수를 와류형 분리장치로 이용하여 처리하는 것이라고 하였다(환경부, 2006).

우리나라는 기상학적으로 일년에 내리는 총강수량의 약 70%가 6~9월의 여름철에 집중적으로 발생하기 때문에 하천범람이나 저지대 침수방지 목적으로 빗물펌프장을 운영하고 있는 실정이며, 국내 CSOs 관리는 전무한 상태로서 다만 오염가능성이 큰 공단지역에서 일부 초기강우(First Flush)를 저류형태로서 처리하도록 하고 있다.

우천시 합류식 하수관거의 우수토실에서 월류되는 월류수는 수계(하천, 해양 저수지, 등)로 직접 유출되며 토실에서 차집된 하수량의 일부도 정상적인 처리를 하지 못하고 방류 되는 경우가 많다. 강우시작과 함께 유출되는 초기 유출수와 오수는 건기하수에 비해 많게는 10배가 넘는 오염도를 나타내고 있으며 이를 감안하면 오염부하면에서 월류수가 수계오염에 미치는 영향은 크다고 할 수 있다(Heinking, 1985). 또한, CSOs는 발생이 매우 불규칙적이고 많은 종류의 난분해성 물질을 함유하고 있으며, 강우초기에 오염물질 농도가 매우 높다. 따라서 CSOs의 제어를 위해 한가지의 처리방법을 이용하는 것보다 복합적인 장치의 구성이 필요할 것으로 생각된다.

본 연구에서 사용된 와류형 분리장치의 특징은 부유물 및 침전성 오염물질의 동시제거가 가능하고 특별한 구동부가 필요 없으며 손실수두가 적어 외부동력원이 필요하지 않다는 점, 넓은 유량범위에 적용이 가능하다는 점, 기존의 CSOs 처리설비에 비해 설치면적이 작으며 기존의 관거 및 신설

관거에 연결이 쉽다는 점 등의 장점을 가지고 있다(Andoh, 2002).

유입 구는 원수가 유입되는 부분으로 유입되는 유체를 접선방향으로 유도하며 dip plate는 난류를 최소화하는 구조로 되어 있어 퇴적물의 재부상을 방지, 하향류 회전흐름과 상향류 회전흐름이 만나는 속도가 제로가 되는 지점에 위치시켰다. 이는 상향류와 하향류의 경계를 만들어 제거효율을 극대화한다. 중앙콘은 내벽과 baffle 사이에 하향류를 유도하고 침전된 고형물이 재부유하는 것을 방지하도록 하였다. baffle은 단락류를 막아 유체의 이동경로를 길게 하며 underflow를 통해 침전물질이 나가게 되고 overflow를 통해 부유물질은 처리된다(Brombach, 2003).

와류현상과 입자의 비중에 의해 고형물 입자를 분리하는 이러한 처리기작은 유입되는 유량과 고형물의 입자 크기 및 비중이 처리효율에 영향을 미치며, 입자 크기와 비중이 클수록 처리효율이 높아진다(Berres, 2003; Field 1996). 일반적인 와류분리기의 처리효율은 CSOs의 특성이나 장치의 구성형태, 크기, 수리학적 부하, 처리대상물질, 방류수계의 수질오염기준 및 보고되는 문헌에 따라 차이가 있을 수 있지만 총부유물질(total suspended solids; TSS)의 제거효율은 약 40~50% 정도로 보고되고 있다(Geiger, 1998).

본 연구는 도시지역 CSOs의 유출부하를 저감시킬 목적으로 설치면적이 적고 구동부 없이 와류를 형성시키고 입자성 물질의 제거가 가능한 장치인 와류형 분리장치를 이용하여 유입 유속별, 입경 크기별, 비중별 실험을 통해 지역적 특색에 맞는 CSOs의 처리 가능성을 평가하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1. 실험장치 개요

Fig. 1(a)는 실험에 사용된 와류형 분리장치의 모식도로 원통부의 하단부분에서 접선방향으로 유입되어 와류를 일으켜 관성력으로 수중의 입자물질을 분리하고 하부배출(under flow)을 통해 부유물 및 침강성 오염물질을 제거하는 원리로 되어 있다. 침전성 오염물질은 하향류를 그리며 와류하는 동안 중앙의 cone아래에 침전되어 배출되며 유량은 유량계로 측정하면서 밸브로 제어 한다.

실험 장치로 저류조, 와류형 처리장치, 하부배출수조, 유입 펌프, 임펠러 등으로 구성되어 있으며 Fig. 1(b)는 와류형 분리장치의 외통에서의 유체 흐름과 내통에서의 유체 흐름을 보여주고 있다.

Table 1에 실험에 사용된 와류형 분리장치의 내경 및 관경을 나타내었다.

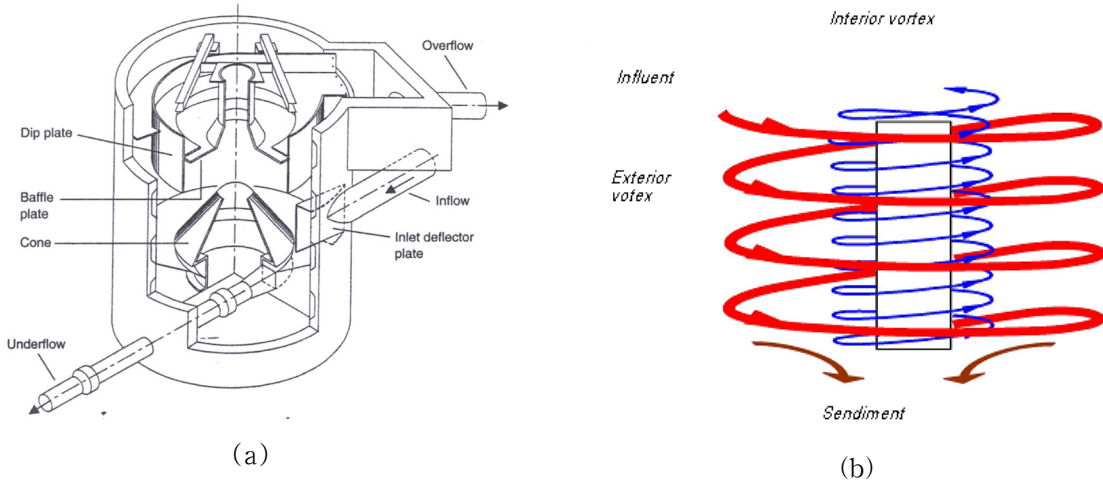


Fig. 1 Experiment equipment diagram & Interior and exterior fluid flow of vortex separator

Table 1 Vortex separator specification

	Factor	Size
Vortex separator	Inflow	40 mm
	Overflow	60 mm
	Underflow	20 mm
	Hight	500 mm
	Diameter	500 mm
	Volume	59 L

Table 2 Input by particle size

Particle size(Sieve size μm)	Input(g)
2,000~4,750	8.8
850~2,000	8.8
600~850	8.8
425~600	8.8
250~425	8.8
180~250	14
150~180	14
75~150	14
75 below	14
Sum	100

2.2. 연구방법

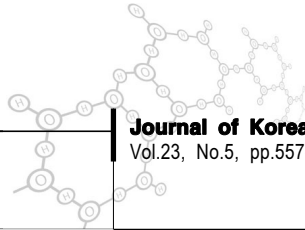
2.2.1 연구방법

와류분리기의 입자 제거 성능에 가장 커다란 영향을 미치는 인자는 입자의 비중과 크기라고 알려져 있으며(EPA, 1999), Chebbo 등(1992)이 강우시 유출수 내 부유성 고형물에 대한 분석을 실시하여, 중량기준으로 분포 고형물질의 대부분(66~85%)이 $100\mu\text{m}$ 이내에 포함된다고 보고하였

기 때문에 glass bead를 이용하여 실험을 실시하였다. 유리알은 도시지역의 표면 유출수 입자의 크기를 고려하여(윤현식, 2006; A. D. Levine, 1991) 최대크기 $3000\mu\text{m}$ 최소크기 $75\mu\text{m}$ 로 하였고 실험에 사용된 입자는 공업용 유리알의 물리적인 특성은 Hardness $42.5\text{kg}/\text{m}^2$, Specific gravity 2.52, Abrasion 3.14, Compressive strength 16.64이다. Table 2는 유리알의 크기를 나타낸 것이다. 또 크기에 따라 효율을 보기 위해서 표준망체를 이용 체분석 (체번호 200(#))을 시행 후 남은 입자들은 폐기하였다

입자는 월류수 입도범위가 다양하고 또한 4~7mm의 조대입자들은 전처리단계에서 제거된다고 가정하였으며(윤현식, 2006) 표준체를 이용하여 $75\sim 150\mu\text{m}$, $150\sim 180\mu\text{m}$, $180\sim 250\mu\text{m}$, $250\sim 425\mu\text{m}$, $425\sim 600\mu\text{m}$, $600\sim 850\mu\text{m}$, $850\sim 2,000\mu\text{m}$, $2,000\sim 4,750\mu\text{m}$ 입도 범위를 정하여 총 100g의 glass bead을 주입하였다.

또한 입자의 제거에 미치는 영향인자인 유입유속에 대한 연구를 위해 glass bead를 이용하여 설계유속을 19.89 m/min, 39.79 m/min, 59.68 m/min로 변화 시켜주면서 그 효율을 입자사이즈별로 살펴보았다. 반응조 유입유량의 과다 월류를 막으면서 유량을 조정 하는 것이 중요하며 각 유량에 따른 하부 배출수와 유출수에서의 입경별 사이즈를 측정하여 그에 따른 효율을 분석하였다. 앞에서도 언급한바와 같이 강우 유출수내의 입자는 부피를 기준으로 할 경우에는 $100\mu\text{m}$ 정도의 입자가 가장 많은 것으로 조사되었다. 유출수의 처리리는 개념에서는 입자수보다는 입자의 양(부피)이 더 의미가 크므로, 이러한 측면에서 볼 때 $100\mu\text{m}$ 이상의 입자를 제거하면 총부유물질의 60% 가량을 제거할 수 있을 것으로 기대된다.



3. 결과 및 고찰

3.1. 유입유속에 따른 입자의 처리효율

유입관경이 4cm이고 설계유속을 19.89 m/min, 39.79

m/min, 59.68 m/min로 변화 시켜주면서 그 효율을 입자사이즈별로 살펴보았다.

입자의 제거율은 빠져나온 입자를 건조한 무게로 측정하였다. Table 3~5에서 살펴보면 유입유속이 증가 할수록 높

Table 3 Particle size removal efficiency by linear velocity at 19.89 m/min

Particle size (μm)	Flow rate			
	Input(g)	Removal(g)	Out put(g)	Removal efficiency(%)
2,000~4,750	8.8	8.8	0	100
850~2,000	8.8	8.8	0	100
600~850	8.8	8.8	0	100
425~600	8.8	8.8	0	100
250~425	8.8	8.8	0	100
180~250	14	13.8	0.2	98.57
150~180	14	12.5	1.5	89.29
75~150	14	11.9	2.1	85
75below	14	10.2	3.8	72.86
Sum	100	92.4	7.6	92.4

Table 4 Particle size removal efficiency by linear velocity 39.79 m/min

Particle size (μm)	Flow rate			
	Input(g)	Removal(g)	Out put(g)	Removal efficiency(%)
2,000~4,750	8.8	8.8	0	100
850~2,000	8.8	8.8	0	100
600~850	8.8	8.8	0	100
425~600	8.8	8.8	0	100
250~425	8.8	8.8	0	100
180~250	14	14	0	100
150~180	14	11.5	2.5	82.14
75~150	14	10.2	3.8	72.86
75below	14	8.9	5.1	63.57
Sum	100	88.6	11.4	88.6

Table 5 Particle size removal efficiency by linear velocity 59.68 m/min

Particle size (μm)	Flow rate			
	Input(g)	Removal(g)	Out put(g)	Removal efficiency(%)
2,000~4,750	8.8	8.8	0	100
850~2,000	8.8	8.8	0	100
600~850	8.8	8.8	0	100
425~600	8.8	8.8	0	100
250~425	8.8	8.8	0	100
180~250	14	14	0	100
150~180	14	10.2	3.8	72.86
75~150	14	9.5	4.5	67.86
75below	14	8.1	5.9	57.86
Sum	100	85.8	14.2	85.8

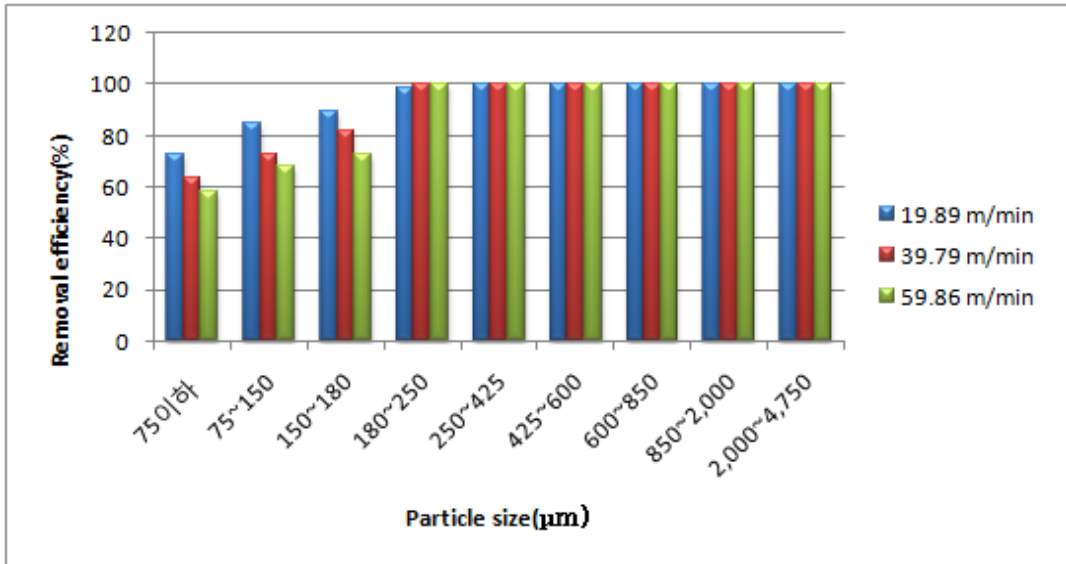


Fig. 2 Removal efficiency by particle size and flow rate

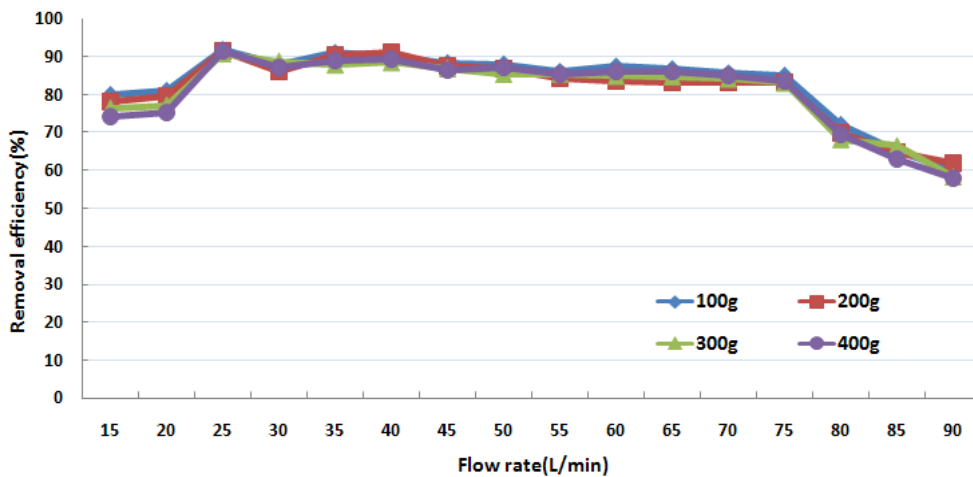


Fig. 3 Removal efficiency by particle input

은 와류에 의해 제거율이 증가할 것이라는 생각과는 다르게 유입유속이 증가할수록 제거율은 낮아짐을 볼 수 있었다.

유속이 19.89 m/min에서 39.79 m/min으로 유속을 2배로 증가시키게 되었을 경우 3.8%의 제거 효율의 차이가 나타났으며 39.79 m/min에서 59.86 m/min의 증가에서는 2.8%의 효율차이를 보여주고 있다. 또한 180~250µm까지는 모든 유속에서 거의 100%제거율이 달성됨을 보여 주고 있다. 이는 입경사이즈가 큰 것들은 와류와 비중에 의해 제거가 어느 정도 되나 입경사이즈가 작은 것은 와류에 의해 오히려

월류되는 것으로 판단되어진다.

와류형 분리장치의 효율기준을 입자제거에 두고 있으며 대부분이 입자크기 150~180µm를 90%제거함을 기준으로 하고 있는데 150~180µm이하의 경우 85%, 72.86%, 67.86%의 제거율을 보여주고 있어 유입관경이 4cm인 경우 19.89 m/min이 설계유속에 가장 적합하다고 판단된다. 이는 유속이 너무 증가하면 형성된 전단력이 증가하여 flocc이 분산되어 처리효율이 감소되는 것으로 향후 와류형 분리장치의 설계시 중요한 기준이 될 것으로 생각된다.

Table 6 Removal efficiency according to specific gravity at 19.89m/min

Particle size distribution(um)	Specific gravity			
	2.52	2.0	1.5	1.1
2,000~4,750	100	100	100	100
850~2,000	100	100	100	100
600~850	100	100	95	91
425~600	100	100	85	75
250~425	100	96	81	70
180~250	98.5	92.2	71.1	62.2
150~180	89.2	72.1	35.5	28.2
75~150	85	55.2	29.21	20.2
75below	72.8	45.2	15.2	8

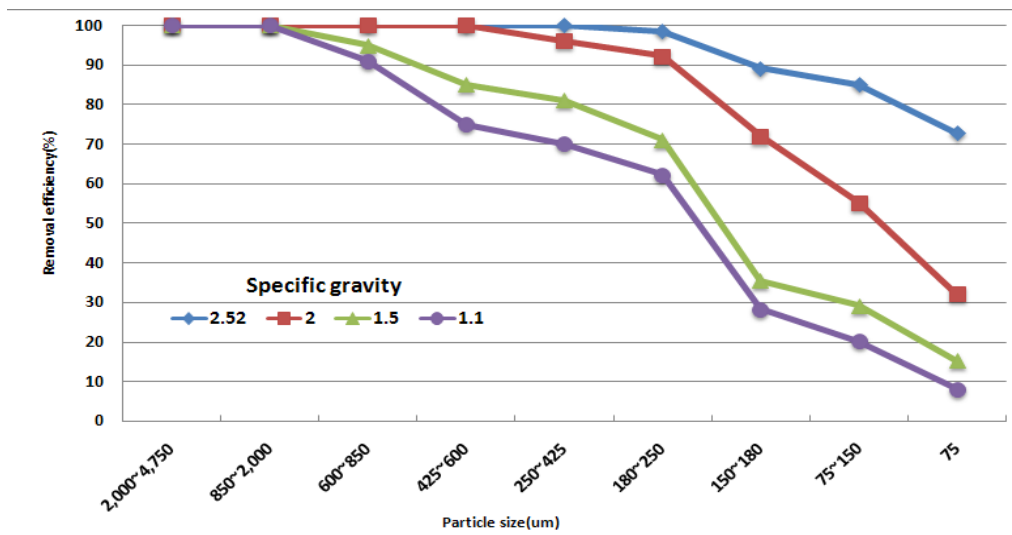


Fig. 4 Removal efficiency by particle size and specific gravity

3.2. 입자 주입량에 따른 입자의 처리 효율

입자 주입량에 따른 제거효율 차이를 확인하기 위해 설계 유속인 19.89 m/min, 39.79 m/min, 59.68 m/min 일 때 제거 효율을 보았다. 가장 제거 효율이 좋은 입자 사이즈는 150~180 μ m로 약 90%를 제거 하고 있기 때문에 이 크기의 glass bead의 양을 점차적으로 늘려 100, 200, 300, 400g 까지 입자를 증가시키며 주입하여 보았으나 그에 따른 효율은 크게 차이가 나지 않았다. 하지만 유입유속을 설계유속인 19.89 m/min에서 59.68 m/min까지 증가 시켰을 때 처리 효율은 대략 20%정도의 차이가 나타났으며 처리 유속이 높을수록 제거율은 낮게 나타났다. 19.89 m/min 일 때 대체로 높은 제거율을 나타냄을 볼 수 있었다.

3.3. 일정 유속하에 입도별 비중별 제거 효율

수리학적 와류기의 성능 평가에서 입도와 비중은 와류기의 성능을 평가하는데 중요한 요소이다. 유속을 19.89 m/min로 고정시킨 후 비중이 다른 공업용 glass bead를 사용하여 그 효율을 보았다.

Fig. 4에서 나타나듯이 입자사이즈가 850~2,000 μ m까지는 비중에 상관없이 100%제거가 되었다. 비중에 상관없이 75 μ m의 경우에는 제거효율이 낮게 나타났으며 전체적인 제거효율을 보았을 때 비중이 커질수록 제거효율이 좋아지는 경향을 나타내었다. 결국 입경이 클수록, 동일 입경일 경우 비중이 클수록 제거효율이 높을 것이라는 구체적인 입자 사이즈로 구분하여 일반적인 사실을 확인할 수 있었다.

Table 7 SS removal efficiency by underflow

Inflow (m/min)	Removal efficiency (%)				
	0	4	6	8	10
19.89	51	53	52	54	55
39.79	38	42	51	52	53
59.68	35	35	41	40	42

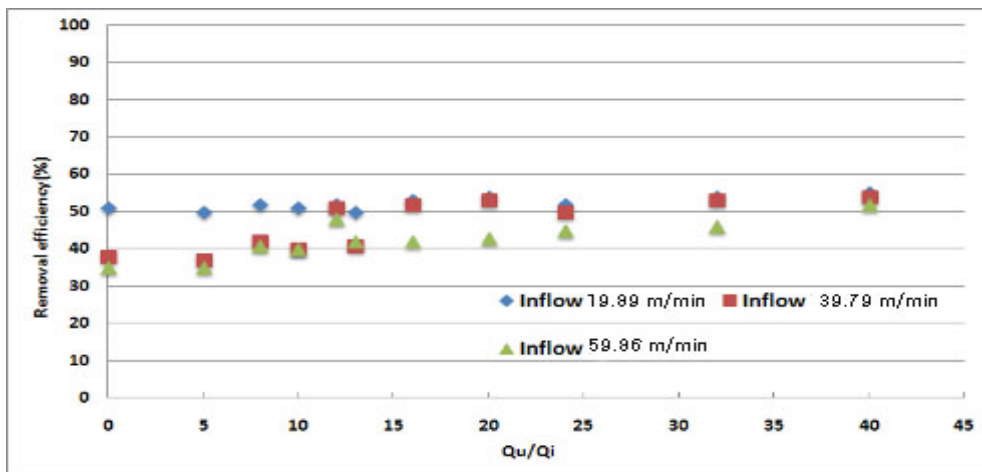


Fig. 5 Removal efficiency by Qu/Qi

3.4. 유입 유속과 하부배출량에 따른 처리 효율

와류분리기를 평가하는 주요 인자중의 하나는 유입유량(inflow)에 따른 하부배출유량(underflow)의 비율(Q_u/Q_i)이다. 즉 vortex 원리를 이용하는 수리학적 분리장치는 하부 배출량에 대해 영향을 크게 받고 있으며 이 비율이 증가할수록 처리효율은 증가된다고 볼 수 있다(HILL, 1991). 이는 하부배출량의 증가가 수면적부하율을 감소시키고, 침전물질의 재부상을 억제함으로써 증력에 의한 침전 효율이 증가함에 기인된다고 판단된다.

Paul(1991)은 Q_u/Q_i 비를 10~25%로 제안하였고 Field et al.(1998)은 와류형 분리장치에 적합한 회전류와 효율을 주기 위해서는 비율(Q_u/Q_i)을 6~10%로 제안하였다. Q_u/Q_i 비가 증가함은 월류되는 양이 많음을 의미하고 이는 유량의 증가를 의미하므로 적절한 비를 산정하는 것을 중요하다. 실제 폐수를 대상으로 실험한 결과 아래 Table 8과 같은 결과를 나타내었으며 유속 19.89 m/min, 39.79 m/min, 59.68 m/min은 각각 유량으로 환산 했을 경우 25 L/min, 50 L/min, 75 L/min이 된다.

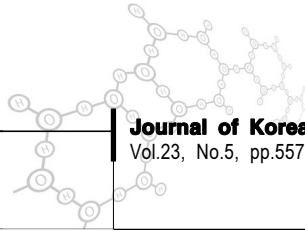
유속이 19.89 m/min인 경우 하부배출량을 7.96 m/min

즉 40%까지 증가시키어도 제거율이 4%정도 증가하는데 반하여 유입유속이 59.68 m/min의 경우 하부배출량을 7.96 m/min(13%)까지 증가시키면 제거율이 7%정도 증가함을 보여주고 있다. 이는 설계유속이 19.89 m/min으로 처리하였을 경우 하부배출에 영향을 적게 받음을 의미하고 유속이 증가할수록 하부배출량의 증가가 처리효율에 비교적 영향을 미치는 것으로 판단된다. 하지만 하부배출량의 증가할수록 하수처리장에 부하를 증가시키므로 이를 감안하여 적절한 하부배출유량을 산정해야 할 것이다.

4. 결론

본 연구는 강우시 하천을 오염시키는 주요 원인으로 알려진 합류식 하수관거 월류수(CSOs)의 효율적인 처리를 위한 연구로서 합류식 하수관거 월류수에 포함되어 있는 입자성 물질의 제거 가능성을 평가하였으며 와류형 분리장치를 이용하여 CSOs의 입자성 물질에 대한 효과적인 제어 방법과 기준을 제시하였다.

CSOs의 처리를 위해 본 연구는 도시유역에서 강우시 발생



하는 합류식 하수관거 월류수(CSOs)의 유출부하를 저감시킬 목적으로 설치면적이 적고 구동부 없이 와류를 형성시키고 입자성 물질의 제거가 가능한 장치를 실험실 규모로 제작하여 처리 실험을 통해 최적 운전 조건 등을 검토하였다.

와류형 분리장치는 설계유속인 19.89 m/min, 39.79 m/min, 59.68 m/min로 변화시켜 그 효율을 입자사이즈별로 분석 하였는데 모든 유속범위에서 180~250 μ m까지는 거의 100%제거율을 달성하였고, 장치형에 대한 설계기준인 150~180 μ m에서는 각각 85, 72.86, 67.86%의 제거율을 나타내었다. 실험을 통하여 얻어진 제거 효율을 통하여 19.89 m/min의 경우가 설계유속에 가장 적합하다고 판단 되어진다.

입자 주입량에 따른 제거효율을 보기 위해 glass bead의 양을 점차적으로 늘려 나가 입자를 주입 하여 보았으나 그에 따른 효율은 크게 차이가 나지 않았으며 제거효율은 입경과 비중이 감소할수록 감소한다는 사실을 정량적으로 확인할 수 있었다. 설계유속을 19.89 m/min으로 처리 하였을 경우 하부배출에 영향을 적게 받았으며 유속이 증가할수록 하부배출량의 증가가 처리효율에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

본 장치는 평균적인 체류시간이 약 1분 정도로 짧게 설계되었는데 이는 강우에 의해 CSOs의 유량이 급격하게 증가 되었을 때에도 이를 원활히 처리하기 위함이다. 하지만 이 경우 유입되는 월류수의 양이 급격히 높아짐에 따라 체류시간이 이보다 짧아져 처리효율이 감소할 수 있다. 또한 기존의 침전지에서 체류시간이 3~5시간인데 반해 1분의 짧은 시간에 처리가 가능한 장점을 가지고 있어 소요 부지의 대폭적인 저감이 이루어질 것으로 기대된다. 향후 이러한 인자들은 본 시설의 설계와 운영시에 반드시 고려되어야 할 것으로 판단되며, 특히 처리효율의 상승을 위해서는 처리 시설 내에서 체류시간을 길게 갖도록 하는 것이 바람직할 것으로 판단 된다.

사 사

본 연구는 2007년도 환경부 차세대 핵심환경기술개발사업으로부터 지원받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 방기용, 이준호, 2001, Swirl 농축분리기를 이용한 합류식 하수관 월류수 처리, *대한환경공학회*, **23**(1), pp. 21~30
2. 윤현식, 이두진, 박영숙, 2006, 입경분포분석을 통한 합류식 하수관거 월류수(CSO) 오염물질 침강성 예측, 상하수도 학회지 **20**(2), pp. 295~302
3. 환경부, 비점오염원 업무편람, 오병철, 공성호, 박주양, 박재우, 2006, SWIRL SCREEN을 이용한 합류식 하수관거 월류수(CSOs) 처리방안 연구, *한국물환경학회 2006년 공동 춘계학술발표회 및 포럼 학술지* pp.315~323
4. A. D. Levine, Tchobanglous G. and Asano T. 1991, Size distribution of particulate contaminants in wastewater and their on treatability, *wat. RES.*, **Vol. 25, NO. 8**, pp. 911~922
5. Andoh R. Y. G, Saul, A. J., 2002, The use of hydrodynamic separators and screening systems to improve water quality, *Sewer Processes and Networks. Paris. France*, pp. 219~229
6. Brombach, H., Xanthopoulos, C., Hahn H. H., Pisano, W. C., 1993, Experience with separators for combined sewer overflow control, *Water Environment & Technology* **27**(5), pp. 93~104
7. Chebbo, G. and bachoc, A., 1992, Characterization of suspended solids in urban wet weather discharges, *Wat. Sci.Tech.*, vol. 25(8), pp. 171~179
8. EPA, 1999, Storm Water Technology Fact Sheet Hydrodynamic Separator, *U.S. EPA* 832-F-99-017
9. Geiger, W. F. 1998, Combined sewer overflow treatment ; Knowledge or speculation, *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 38, No. 38, pp. 1~8
10. Heinking. G. and Wilcoxon. N.. 1985, Use of a swirl concentrator for combined sewer overflow management." *J. WPCF.* **57**(5), 398~402
11. H.I.L, 1991, Technology Inc, Storm King
12. Field R., 1996, O'Connor T. P, Swirl technology : enhancement of design, evaluation, and application, *Journal of Environmental Engineering, ASCE.* **122(EE8)**, pp. 741~748