

## 체류시간에 따른 외류형 비점오염저감시설의 효율변화에 대한 연구\*

이호선\*\*, 최계운\*\*\*, 김남규\*\*\*\*

현재 국내에서는 오염총량관리제 도입과 함께 비점오염원 관리를 위한 법적 규제가 마련되어 있지만, 비점오염원의 제거 효율에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 또한, 강우유출수에 의해 발생하는 비점오염원은 강우특성에 따라 다양한 패턴으로 발생하게 되는데 처리시설의 적정 체류시간이 보장되지 않을 경우 대부분의 오염물질은 처리시설을 거치지 않고 그대로 수계에 방류하게 된다. 하지만 체류시간을 지나치게 높일 경우 시설의 규모가 지나치게 커지고 작을 경우 처리할 수 있는 용량이 적어져 시설효율이 낮아지는 원인이 되므로 적절한 체류시간의 확보는 비점오염저감시설의 가장 중요한 매개변수라고 할 수 있다. 본 연구에서는 체류 시간에 따른 부유물질의 제거 효율을 측정 하고, 제거된 후 시설 내에 잔류하게 되는 누적부하량의 변화에 따른 부유물질의 제거 효율을 분석하였다. 실제 현장에서 설치되고 운영되고 있는 경기도 상번천리 지역의 외류형 비점오염저감시설을 참고하여 1/4축적의 정상모형을 제작하고, 체류시간에 따른 제거효율과 시설 내 누적된 부유물질의 제거량에 따른 효율변화를 연구하였으며, 그 결과 체류시간이 45초 일 때, 부유물질의 제거에 가장 효율적인 것으로 나타났고, 시설내로 유입된 오염물의 누적부하량의 처리용량 대비 비율이 845 ~ 1,125g / m3을 초과하게 되면, 부유물질 제거효율이 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

**주제어** : 외류형, 비점오염, 저감시설, 강우유출, 체류시간

### 1. 서론

현재 국내에서는 오염총량관리제 도입과 함께 비점오염원 관리를 위한 법적 규제가 마련되어 있으며, 환경부에서는 비점오염저감시설의 설치 및 관리·운영 매뉴얼(환경부, 2008)을 발간하여 비점오염저감시설의 현장 적용에 있어서 효율적인 설치와 운영관리과 될 수 있도록 그 발판과 토대를 마련하였다.

\* 본 연구는 인천대학교 2012년도 자체연구비를 지원받아 시행한 연구성과입니다.

\*\* 제1저자, 스마트워터그리드연구단 사무국장

\*\* 교신저자, 인천대학교 도시환경공학부 건설환경공학과 교수

\*\*\* 공동저자, 인천대학교 도시환경공학부 건설환경공학과 석사과정

비점오염원 저감시설은 실제 처리용량 계획시에 대상강우, 체류시간 등의 설계인자가 필요하지만, 법적기준에는 누적유출고 5mm만 처리하도록 규정되어 있다. 따라서 합리적인 처리용량 산정이 어려울 뿐만 아니라, 현장에서 다소 혼선을 빚고 있는 실정이다.

법적 기준이 5mm로 되어 있는것과 연관해서 이러한 기준이 적정한가를 분석하기 위한 관련 연구로서 최근 도로에 대한 비점오염 물질의 발생에 대한 연구와 장치형 시설의 효율에 대한 연구가 진행되었고(박종식 외, 2007), 위승경 외(2007)는 와류형 시설에 의한 강우 유출수내 비점오염물질의 처리 효율을 분석하여, 비점오염물질의 처리효율은 강우량, 강우 전 건조일수, 강우강도 등 강우량 특성에 따라 민감하게 반응하는 것으로 나타낸 바 있다. 또한, 환경부는 2006년부터 4대강수계에 비점오염저감 시범시설을 설치하고, 시설에 대한 모니터링을 수행하여 시설의 현장효율은 제시(환경부, 2008)하였으나, 누적유출고 5mm의 타당성과 이에 따른 설계인자에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다.

한편, 비점오염저감시설 설치신고제도가 활성화 되면서 향후 전국적으로 몇천개의 장치형 비점오염저감시설이 설치될 예정이나 올바른 설치기준 및 유지관리 기준이 마련되어 있지 않아 국가적으로 막대한 사회적 비용의 지출과 비점오염을 효율적으로 저감하지 못하면서 발생하는 수계의 오염이 우려되고 있다.

와류형 시설은 우수 중에 포함된 오일 및 부유물과 침전성 고형물을 효과적으로 제거할 수 있게 제작된 와류형(볼텍스)분리기가 장착된 시설을 의미한다. 별다른 동력없이 유입된 유량은 분리판 외부에서는 하향류, 내부에서는 상향류의 수력학적 와류(Vortex)가 형성되면서 Oil과 부유물은 수표면으로 상승하여 저류되고, 입자성 고형물질은 입자에 작용되는 원심력과 충돌·흡착현상 운동방향 전환 등의 처리기작 및 중력 침전효과에 의해 침전하여 저류되어 제거되는 원리를 가지고 있다. 따라서 원심력과 중력 침전효과를 결정하는 내부 체류시간은 와류시설의 효율에 많은 영향을 끼치게 되어있다.

본 연구에서는 실제 설치되고 운영되고 있는 와류형 장치의 모형을 제작하고, 체류시간에 따른 제거효율과 시설 내 누적된 SS량에 따른 효율변화를 연구하여 와류형 시설의 적정 체류시간과 관리주기를 제시하고자 한다.

## II. 연구방법

### 1 실험장치의 축척결정

모형실험에 있어서 수리학적 상사에 부합되는 모형을 제작하기 위해서는 수평, 연직축척, 시간, 유량 등을 일정한 관계식에 의하여 결정하여야 하며, 실험장치, 부유사 등의 제한으로 위의 변수들을 충분히 만족시킬 수 없을 때에는 각 변수에 대한 상사를 조절하여야 한다. 또한, 흐름에 있어서 지배하

는 힘에 따라 해당조건에 맞는 상사 법칙을 적용 하여야 한다. 흐름을 주로 지배하는 힘이 점성력일 경우 Reynolds 상사, 흐름이 자유표면을 가지고 주로 중력에 의한 지배를 받을 시에는 Froude 상사, 흐름을 주로 지배하는 힘이 표면장력인 조건에는 Weber 상사, 유체가 탄성을 갖고 있을 경우에는 Cauchy 상사의 법칙에 따라 상사법칙을 적용하게 된다.

와류형 시설의 경우 자유표면을 갖고 중력에 의한 힘이 지배하므로 실험장치는 Froude 상사법칙을 적용하였다. 본 연구에서는 1ha에서 발생하는 강우유출수를 처리할 수 있도록 설계된 실제 와류형 시설을 1/4로 축소하여 적용하였다. <표 1>은 모형에 적용된 상사법칙에 따른 원형과 모형의 상사비를 정리한 것이다.

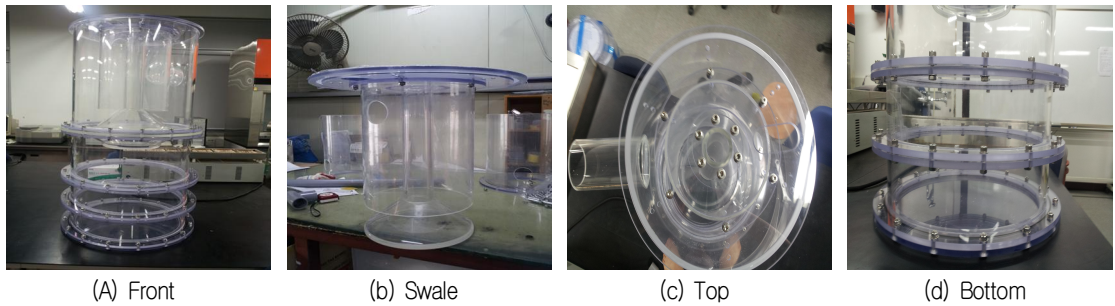
<표 1> Ratio of Similarity of Original Facility and Model

Physical Factor	Ratio of Similarity	Ratio	Physical Factor	Ratio of Similarity	Ratio
Horizontal Length	$X_r$	4	Flowrate	$X_r Y_r^{3/2}$	32
Vertical Length	$Y_r$	4	hydraulic mean depth	$R_r$	4
Area	$X_r Y_r$	16	Time	$X_r Y_r^{-1/2}$	2
Velocity	$Y_r^{1/2}$	2	Volume	$X_r^2 Y_r$	64

## 2. 모형제작

현재 우리나라에 적용되고 있는 와류형 비점오염저감시설의 경우 시설별로 차이가 있으나 일반적으로 유입부, 회전부, 침사부, 유출부를 공통적으로 가지고 있다. 침강을 발생시키는 내부 회전력과 재부상을 방지하기 위한 침사부가 주요 영향인자로 본 실험장치는 위 4가지 요소가 포함되도록 구성하되 유입부 각도와 회전부 내부 반경, 침사부 깊이 등을 변경하여 다양한 조건이 반영될 수 있도록 설치하였다.

일반적으로 우리나라에서 현장에서 설치되고 있는 와류형 시설들 소규모 시설로 주로 1ha이내에 유역에서 발생하는 비점오염원의 처리를 목적으로 설치되고 있는데 실제로 경기도 광주시 상번천리에서 설치되고 운영되고 있는 와류형 장치를 대상으로 하였다. <그림 1>은 제작된 모형의 모습으로 실험에서 관찰하고자 하는 내용과 실험조건, 상사법칙의 효율성을 고려하여 결정하였으며, 실험장치는 실제 현장에 설치된 시설의 1/4 정상모형 수준으로 제작하고, 침사부 깊이와 내부직경, 유입각도 등을 임의로 바꿀 수 있도록 하여 실제 유입되는 강우와 현장설치조건이 고려될 수 있도록 적용하였다.



<그림 1> General View of Model

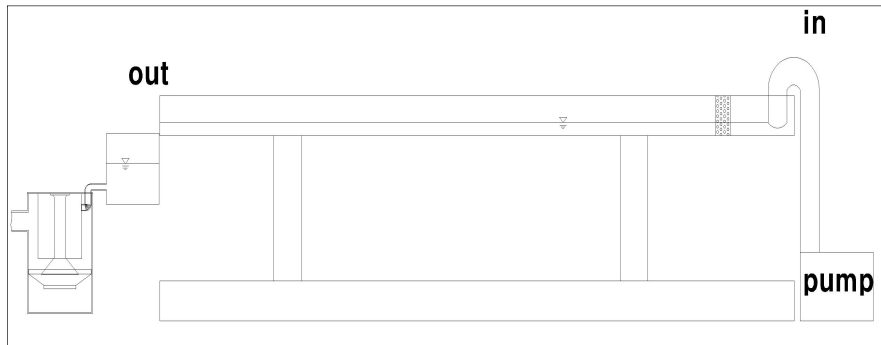
물의 유입은 저감시설의 상부에서 0.25m 아래의 지점에 발생되며, 유출은 0.2m 떨어진 지점에서 발생한다. 실험장치의 관의 내경은 0.03m이고, 높이는 0.7m이다. 하단에는 침사부에 침전된 부유물질의 역류를 방지하는 장치로 상부에서 0.49m 하단에 위치하고 있으며, 그 하단에 위치한 침사부의 높이는 0.22m이며, 용량은 0.034m<sup>3</sup>이다. 또한, 내부 처리과정을 확인할 수 있도록 투명 재질의 강화 아크릴로 제작하였으며, 제작된 실험장치의 세부 제원은 <표 2>와 같다.

<표 2> Consist of Model

	Width(m)	Height(m)	Volume(m <sup>3</sup> )
Entire	0.45	0.7	0.111
Swale	0.45	0.49	0.078
Bottom	0.45	0.21	0.033
Outlet	0.1	0.1	-

### 3. 실험조건

<그림 2>와 같이 실험 장치를 모형 개수로에 연결시켜 유량을 유입시킴으로 현장에서 실제로 유입되는 형식에 가장 가까운 방식으로 실험을 진행하였다. 유량의 공급은 저수조에 있는 원수를 펌프를 사용하여 폭 0.3m, 길이 15m 직사각형 개수로에 유입시키고, 개수로 하단부에 위치한 수조부에 유입이 된다. 이 수조부에는 웨어가 설치되어 있고, 이 웨어의 높이를 조절하여 실험조건에 맞는 유량을 유입시킬 수 있다



<그림 2> Conceptual Diagram

적절한 유량을 공급하기 위하여 수조부에 설치된 유출부, 웨어의 높이와 유량에 관한 실험을 진행 하였으며, 웨어 높이에 따른 유입 유량은 1ha의 배수면적을 가지는 시설에 5mm/h가 시설로 유입되는 유량50m<sup>3</sup>/hr에 해당하는 유량이며, 모형에서는 2.25m<sup>3</sup>/hr에서 5.143m<sup>3</sup>/hr까지 범위로 <표 3>과 같다. 이러한 실험조건은 실제 이 시설에서 조사된 5년간의 모니터링 결과 유입된 최대유량과 일반적으로 설치되는 시설에서 가능한 유입·유출 단차를 단계별로 적용될 수 있도록 실험조건을 구성하였다.

<표 3> Flowrate according to Variation of Weir Height

Weir Height(m)	Flowrate(m <sup>3</sup> /hr)
0.1	2.25
0.2	2.769
0.3	3.364
0.4	3.913
0.5	4.557
0.6	5.143

최대 효율이 발생했던 45초를 기준으로 5초씩 증감시켜 실험을 진행 하였으며, 총 8단계의 체류시간 변화와 지속시간 경과에 따른 처리효율을 확인하였다. 유량은 고수조에 설치된 웨어의 높이를 조절하여 일정한 유량이 흐르는 상태에서 실험조건에 맞는 유량을 유입하였다. 체류시간은 5초 간격으로 35~70초로 8가지 CASE로 실험하였으며, 동일 체류시간에서도 현장에서 설치시에 유출입 단차가 달라질 수 있으므로 0.6m에서 0.1m까지 6단계로 단차를 두고 실험을 진행하였다. SS 측정은 5분 간격으로 채수하여 4회 실행, 총 20분 동안 측정하였고 산술평균값을 사용하였다.

시료는 실제 현장과 유사한 조건으로 다음과 같은 연구결과를 활용하였다. 도로의 경우 유입특성이 매우 다양하나 보통 200ppm 수준이며, 입경은 해당시설의 퇴적물을 직접 채수하여 입도분석을 한 결과 0.3mm~0.075mm 수준으로 나타났다(한국환경공단, 2010). 상사법칙에 맞게 축소하면 0.15mm~

0.075mm의 범위로 먼저 토양을 채취하고, 세정작업을 거친 후 건조 과정을 거쳐 시료가 완전히 건조된 후 체가름 시험을 하여 흙을 분류하였다. No.200체 통과시료 30%, No.140체 통과시료 30%, No.100체 통과시료 40%를 물과 혼합하여 200mg/L의 농도를 가지는 원수를 제작하여 사용하였다.

수질 측정은 제거효율의 도출이 가능하도록 유입부와 유출부에서 측정하였고, SS분석은 수질공정시험법을 적용하였다. 효율평가에는 4가지 방법이 활용될 수 있으나(이호선, 2010), 본 연구에서는 총부하량 평가법(Summation of Loads, SOL)으로서 식(1)과 같이 유입부하량과 유출부하량을 각각 산정한 후 유입부하량과 총 유출부하량을 합산하여 저감효율을 산정하는 방식을 활용하였다. 여기서,  $RM_i(kg)$  = 총 저감량을 나타내고,  $M(In)_i(kg)$  = 총 유입부하량을 나타낸다.

$$\text{저감효율 (\%)} = \frac{\sum_{i=1}^N RM_i}{\sum_{i=1}^N M(In)_i} \quad (1)$$

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 체류시간에 따른 SS저감율

유입유량이 달라지게 되면, 시설내의 내부 회전력과 체류시간이 변하게 되며, 이는 와류형 시설의 효율을 결정짓는 가장 큰 요인이라고 할 수 있다. <표 4>는 체류시간에 따라 내부 유속변화를 나타낸 것으로 체류시간이 길어질수록 내부회전속도는 적어지는 것을 볼 수 있다.

<표 4> Variation of Inner Velocity according to Detention Time

Detention Time(Sec)	Inner Velocity(m/s)
35	0.649
40	0.583
45	0.527
50	0.444
55	0.329
60	0.273
65	0.197
70	0.115

와류형 시설에서 발생하는 내부 회전력은 체류시간에 따라 달라지므로 체류시간에 따른 시설의 효율을 분석하였다.

<표 5>, <그림 3>은 체류시간과 유량 따른 저감율을 표로 나타낸 것이다.

<표 5> Ratio of Removal according to Detention Time(%)

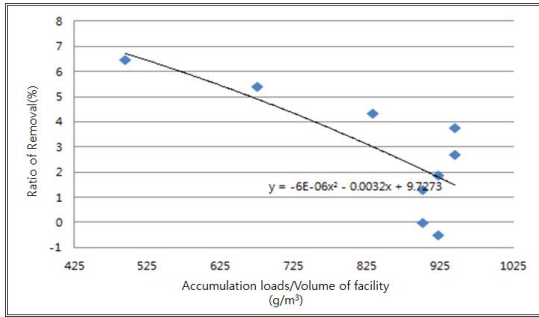
Difference of Inlet and Outlet(m)	Detention Time(Sec)							
	35s	40s	45s	50s	55s	60s	65s	70s
0.6	6.3	6.8	7.9	7.7	7.2	7.2	6.8	6.4
0.5	6.2	7.0	8.0	7.8	7.2	7.3	7.1	6.5
0.4	7.0	7.8	8.2	8.2	7.8	7.8	7.3	6.2
0.3	6.9	7.7	8.8	8.5	7.9	7.3	7.0	6.3
0.2	7.0	8.1	9.1	8.9	7.9	7.1	7.0	6.8
0.1	7.5	8.4	9.2	8.7	8.0	7.7	7.2	6.7

<표 5>에서와 같이 동일 단차에서 저감률은 체류시간 45초 까지는 상승하다 45초 이후로 점차 떨어지는 것으로 나타났다. 유출입 단차가 0.1m이고 체류시간 45초일 때 저감률 9.2%로 최대 효율이 나타났으며, 유출입단차가 0.5m이고 체류시간 70초일 때 6.2%로 가장 낮은 저감율이 나타났다. 이는 체류시간 45초에서 적정 와류속도가 형성되어 고형물 입자의 침전효율이 증가하지만, 체류 시간이 40초 미만인 경우 오히려 빠른 유속으로 인해 난류가 발생되어 제거효율이 낮아지고 체류시간이 50초가 초과할 경우에는 느린 유속으로 인해 고형물 입자의 침전효과가 낮아지는 것으로 판단된다.

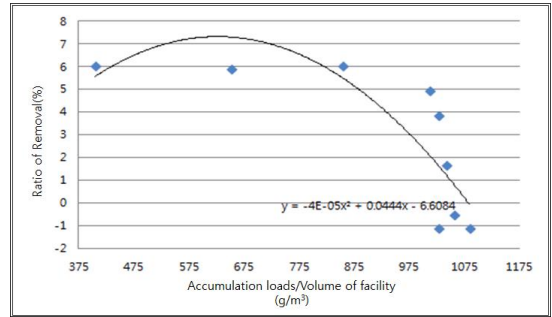
## 2. 누적부하량에 따른 SS저감율

와류형 비점오염저감시설의 경우 수질오염물질이 제거되지 않고 내부 잔류량으로 시설 내에 계속 적체되게 될수록 시설의 저감효율은 낮아진다(이호선, 2010). 본 연구에서는 시설내부의 고형물이 계속 축적될 경우 저감효율에 미치는 영향을 정량적으로 파악하기 위해 누적부하량에 따른 제거효율을 분석하였다.

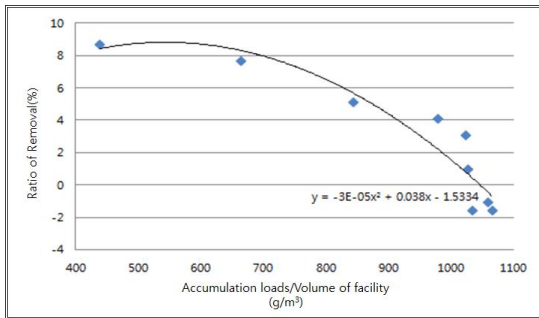
<그림 3>은 누적부하량 변화에 따른 SS저감율에 대한 그래프이다. 시설내부에서 적체되는 부하량이 증가할수록 단차마다 저감효율이 떨어지는 시점은 조금씩 상이하나 단위용량당 부하량이 일정수준 이상이 되면 SS저감 효율이 급격히 감소하기 시작하는 것을 볼 수 있다.



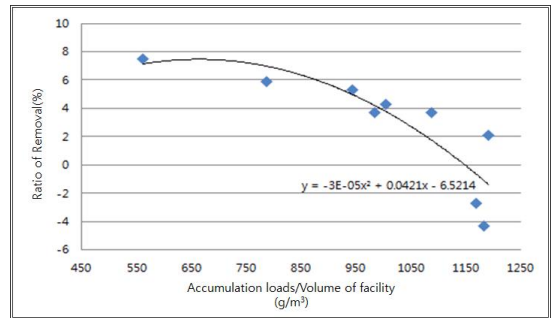
(a) 0.6m



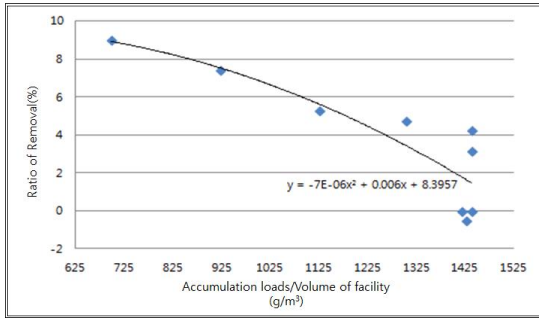
(b) 0.5m



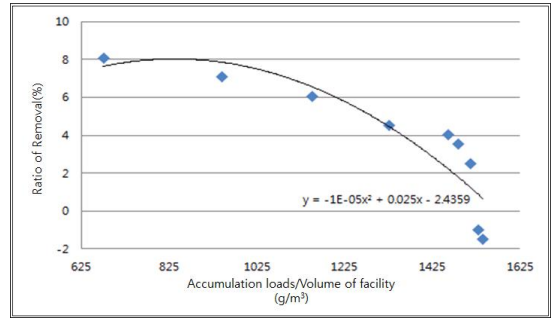
(c) 0.4m



(d) 0.3m



(e) 0.2m



(f) 0.1m

<그림 3> Ratio of Removal of SS according to Difference of Inlet and Outlet

제거효율의 파과점은 845~1,125g/m<sup>3</sup> 범위에서 나타났으며, 단차가 적을수록 제거효율의 파과점은 늦게 나타났다. 단차가 작을수록 저감 효율이 떨어지기 시작하는 시점은 늦춰지는 현상으로 볼 수 있으며, 이는 단차가 작을수록 시설내부에 교란이 적게 발생하여 누적된 부유물들이 부상하지 않는 것으로 판단되나 보다 다양한 침사부 깊이와 내부용량의 추가실험을 통한 일반화가 필요할 것으로 보인다. 본 실험값으로 제시된 R2 값은 (a)=0.56, (b)=0.67, (c)=0.87, (d)=0.74, (e)=0.75, (f)=0.78으로 나타났다.

## IV. 결론

본 연구에서는 소규모 배수구역에 주로 활용되는 와류형 비점오염저감시설의 운영 형태의 변화에 따른 효율성을 분석하기 위하여 배수면적 1ha의 배수구역에서 발생하는 유입 유량과 유입 수질을 분석할 수 있는 수리모형을 제작하였다. No.200체 통과시료 30%, No.140체 통과시료 30%, No.100체 통과시료 40%를 물과 혼합하여 200mg/L의 농도를 가지는 원수와 2.25m<sup>3</sup>/hr에서 5.143m<sup>3</sup>/hr까지의 유량으로 수리모형실험을 진행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 유출입 단차에 상관없이 체류시간 45초인 유입유량 조건에서 최대 저감효율이 나타났다. 유출입 단차가 0.1m이고 체류시간 45초일 때 저감을 9.2%로 최대 효율이 나타났으며, 유출입단차가 0.5m이고 체류시간 70초일 때 6.2%로 가장 낮은 저감율이 나타났다. 이는 체류시간 45초에서 적정 와류속도가 형성되어 고품물 입자의 침전효율이 증가하지만, 체류 시간이 40초 미만인 경우 오히려 빠른 유속으로 인해 난류가 발생되어 제거효율이 낮아지고 체류시간이 50초가 초과할 경우에는 느린 유속으로 인해 고품물 입자의 침전효과가 낮아지는 것으로 판단된다. 따라서 저감시설을 실제로 설치할 경우, 1분 30초의 체류시간을 유지할 수 있도록 시설 설계가 이루어지는 것이 바람직해 보인다.

둘째, 저감시설 누적부하량에 따른 저감율을 분석한 결과 시설내부에서 적체되는 부하량이 증가할수록 단차마다 저감 효율이 떨어지는 시점은 조금씩 상이하나, 단위용량당 부하량이 일정수준이상이 되면 SS저감 효율이 급격히 감소하는 현상을 나타내었다. 제거효율의 파과점은 845~1,125g/m<sup>3</sup> 범위에서 나타났으며, 단차가 적을수록 제거효율의 파과점은 늦게 나타나지만 다양한 침사부 깊이와 내부용량의 추가실험을 통한 일반화가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구를 활용하여 와류형 시설의 설계 시에 적정체류시간의 설계인자로 활용할 수 있다고 사료되며, 시설의 적정 효율을 유지하기 위한 준설 등의 유지관리 주기 산정시에 참고가 가능하다고 판단된다. 보다 범용적인 결과 도출을 위하여 다양한 입경의 SS와 침전부 적용에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- 박종식, 고정현, 김상근, 정하익. 2007. 도시지역 비점오염원 관리를 위한 와류필터형 처리시설의 효율성 연구: 한국환경복원녹화기술학회지. 10(6): 88-98.
- 윤용남. 2002. 수리학. 서울: 청문각.
- 이호선. 2010. 비점오염저감시설 형태별 유입부하량 변화에 따른 관리주기 산정에 관한 연구. 인천대학교 박사학위논문.

- 위승경, 정용준, 길경익. 2007. 와류형 시설에 의한 도로 강우유출수내 비점오염물질의 처리효율분석. 대한상하수도학회 · 한국물환경학회 2007년 공동 추계학술발표회 논문집. 122-127.
- 환경부. 2008. 비점오염저감시설의 설치 및 매뉴얼.
- 환경부. 2008. 한강수계 비점오염저감시설 모니터링 및 유지관리..
- 환경부. 2010. 4대강수계 비점오염저감시설 모니터링 및 유지관리.
- 환경부. 2011. 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률.

---

**李灝善**: 2010년 인천대학교 건설환경공학과 박사학위를 취득했으며(비점오염저감시설 형태별 유입부하량 변화에 따른 관리주기 산정에 관한 연구), 현재 국토해양부 스마트 워터 그리드 연구단 사무국장으로 재직중이다(hilhs21@hanmail.net).

**崔桂標**: 1985년 2월 서울대학교 공과대학 토목공학과 석사학위를 취득했으며(Estuary에서의 부정류의 수치해석), 1991년 5월 Colorado State University 토목공학과 박사학위를 취득하였다(Hydrodynamic Network Simulation through Channel Junctions). 현재 인천대학교 도시과학대학 건설환경공학부 정교수로 있으며, 2012년 7월부터 현재까지 국토해양부 스마트 워터 그리드 연구단장으로 연구를 진행하고 있다(gyewoon@incheon.ac.kr).

**金男圭**: 현재 인천대학교 대학원 건설환경공학과 석사과정에 재학중이다(kyle2721@naver.com).

투 고 일: 2013년 03월 05일  
수 정 일: 2013년 03월 25일  
게재확정일: 2013년 03월 28일

## The Analysis of Characteristic of Efficiency in the Diffusion Pollution Improvement Facilities with Vortex Type according to Detention Time

Hyo Seon Lee, Gye Woon Choi, Nam Kyeu Kim

The removal efficiency of nonpoint source pollution, according to the accumulated runoff depth by law, has not been accurately projected. This research measured removal efficiency of SS(Suspended Solid), depending on the detention time. Also, removal efficiency of SS , depending on the variation of accumulated loads was measured. The 1/4 scale model was used to measure changes to the efficiency of diffusion pollution improvement facilities with vortex type. The results showed that when hydraulic detention time was 45 seconds, it was the most efficient for SS removal. Once the quantity ratio of accumulated loads exceeds  $845 \sim 1,125 \text{ g/m}^3$ , the SS removal efficiency decreases rapidly.

**Key words:** vortex-type, nonpoint pollution, reduction facilities, rainfall-runoff, detention time