

Evaluation of hydraulic dead-zone and particle removal efficiency in the base frame of a constructed wetland using computational fluid dynamics

인공습지 기본형상에서 전산유체역학을 이용한 사류구간 및 입자제거율 평가

Young-Gyun Choi* · Min-Cheol Park

최영균* · 박민철

Department of Environmental Engineering, Daegu University

대구대학교 환경공학과

Abstract : Hydraulic dead-zone and particle removal efficiency in the base frame of a constructed wetland was evaluated with computational fluid dynamics (CFD). The fraction of hydraulic dead-zone was estimated to be 1.2-2.1 % (v/v) and it was attributed to the artificial islands developed in the constructed wetland. Solids deposition rate could be increased with higher hydraulic retention time (HRT, ranged from 2.2 to 4.2 hr) of the wetland and larger particle size (ranged from 10 to 50 μm) in the influent. Experimental results showed that the volume concentration of the particles smaller than 10 μm in diameter was varied from $1.99 \times 10^3 \mu\text{m}^3/\text{ml}$ (HRT 12.8 hr) to $3.92 \times 10^3 \mu\text{m}^3/\text{ml}$ (HRT 2.2 hr) in the influent of the constructed wetland. With the effluent volume concentration data, removal efficiency of those particles was calculated to be 71.2 and 24.7 % when the HRT was 12.8 and 2.2 hr, respectively. Similar trend with the HRT variation could be identified with CFD analysis.

Key words : computational fluid dynamics, constructed wetland, hydraulic dead-zone, solids deposition rate

주제어 : 전산유체역학, 인공습지, 수리학적 사류영역, 고형물 침적율

1. 서론

인공습지에 의한 수질정화 방법은 점오염원 배출수 처리방식으로 제안된 기법이었으나, 최근 비점오염원 저감을 위해 이 방법이 적용되는 사례가 증가하고 있다. 국내에서도 비점오염원 저감시설로 인공습지가 도입되어 한강수계 (2개소), 금강수계 (5개소), 영산강수계 (1개소), 낙동강수계 (1개소)에서 4대강 시범사업으로 설치·운영되고 있다. 그러나 인공습지는 단순 습지, 식생대의 형태로 적용·운영되면서 실제 수질정화효과에 의문점이 제기되고 있다 (Choi et al., 2007).

대부분의 인공습지가 plug - flow reactor (PFR)의 이상적인 흐름을 고려하여 설계되지만 몇몇 연구에 의하면 인공습지 내에서의 흐름은 PFR과 CSTR (continuous stirred tank reactor)의 혼합 형태에 가까운 것으로 보고되고 있다 (Urban, 1990; Kadlec et al., 1993). 또한 수리학적 체류시간 (hydraulic retention time, HRT)은 계산을 통해 얻어지는 고정된 값이 아닌 인공습지 내에서 영역별로 상이한 값을 보이는 값임에도 불구하고 많은 연구결과에서 수리학적 체류시간을 특정 값으로 단순화 하여 적용하고 있다. 인공습지 설계 시 channeling 현상, short circuiting 현상, dead zone 등을 고려하지 않는다면 이론적 체류시간과 실제 체류시간 간의 큰

* Received 25 April 2013, revised 12 August 2013, accepted 14 August 2013.
* Corresponding author: Tel : 053-850-6692 Fax : 053-850-6699 E-mail : choiyg@daegu.ac.kr

차이가 발생할 수 있다. 이러한 문제점들은 전산유체역학 (computational fluid dynamics, CFD)을 활용한 유동해석 및 사류영역 파악을 통해 상당 부분 해결 가능한 것으로 보고되고 있다 (Kadlec et al., 1993). Walker (1998)는 2차원 전산유체역학을 이용하여 인공습지의 길이와 폭의 비율이 4:1 일 때의 체류시간은 순수한 plug flow의 체류시간과 유사함을 확인하였고, Koskiahio (2003)는 2차원 전산유체역학을 통해 인공습지에 baffles을 설치할 경우, 수리학적 성능이 상당히 개선될 수 있음을 확인하였다. Li et al. (2007)은 lab scale 실험과 CFD 해석을 통해 자유수면형 인공습지에서의 입자상 물질의 농도 및 크기에 따른 분포에 대해 연구하였고, 이를 통해 입자크기에 따른 침적 제거율을 예측할 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서는 식생을 제외한 인공습지의 기본 형상을 대상으로 CFD 해석을 수행하여 습지 내 유속 분포를 파악하고자 하였으며, 이를 통해 습지의 사류영역을 수치화 하는 것을 주요한 목적으로 하였다. 이는 인공습지의 설계 시 형상변수가 사류영역 발생에 미치는 영향에 대한 정보를 제공하기 위함이다. 본 연구의 두 번째 목표는 강우 시 인공습지에 유입된 입자의 침적, 제거분포를 정량적으로 해석하는 것이었으며 입자의 침적, 제거효율을 실제 인공습지 분석결과와 비교·평가하여 이론적 해석결과를 검증하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 분석대상 인공습지

본 연구에서는 Y시에 위치한 Y인공습지를 대상으로 선정하여 유체의 유동해석 및 입자상 물질의 제거효율을 예측하였다. 습지의 면적과 체적은 각각 7,100 m², 2,170 m³이고, 평균수심은 0.3m인 비교적 작은 규모의 인공습지이다. 일반적으로 인공습지의 체류시간은 5-14일 정도로 제안하고 있으나 (Reed et al., 1995), 1일

이하의 짧은 HRT로 인공습지를 운영하는 경우도 소개되고 있다 (Jang et al., 2004). 뿐만 아니라 강우 시에는 소형 인공습지의 경우 HRT가 6시간 이하로 급감하는 경우가 빈번하다. 따라서 강우 시와 같이 많은 양의 빗물이 표면 유출되어 습지로 유입될 경우에는 무엇보다 습지의 형상이 입자상 물질의 제거효율에 큰 영향을 미친다고 할 수 있다. Fig. 1에 본 연구에서 선정한 인공습지의 사진 (a)과 3차원 설계 형상을 제시하였다.

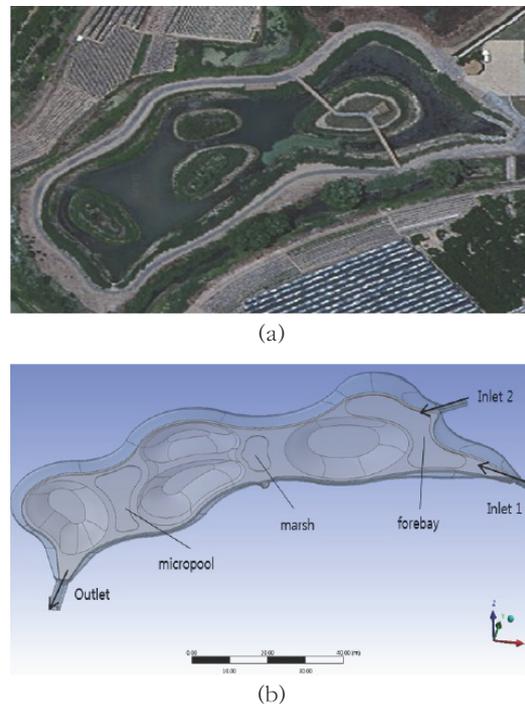


Fig. 1. A picture (a) and 3-D geometry (b) of Y constructed wetland

2.2. 습지 운영조건 설정

습지의 운영조건을 결정하는 변수는 여러 가지가 있으나, 본 연구에서는 습지의 기본 형상만을 대상으로 연구를 수행하였기 때문에 습지의 유입유속과 유입수에 포함된 입자의 농도 및 크기 분포만을 운영 변수로 설정하였다. 각각의 변수에 대한 구체적 해석 조건은 강우 사상 (Event1, Event2) 이후 실제 습지의 운영 현황

을 바탕으로 하여 정하였다 (Table 1).

Table 1. The analytical conditions for Y constructed wetland

	Velocity (cm/sec)		Avg. HRT* (hr)	Avg. SS** (mg/L)	PSD*** (μ m)
	Inlet1	Inlet2			
Event1	29.8	21.6	2.2	84.3	10-50
Event2	15.8	9.9	4.2	72.5	10-50

*Avg. HRT = Vol. of constructed wetland (2,170 m³)/(inlet velocity \times inlet area)

** SS: Suspended Solids (Inlet)

*** PSD: Particle Size Distribution

Hayes et al. (2000)의 연구결과에 의하면 100 μ m이하의 입경을 가지는 silt, clay와 같은 입자는 약 20 cm/s 유속을 기준으로 그 이상일 경우 transportation이 강한 영역에 속하며, 그 미만일 경우 deposition이 강한 영역에 속한다. 따라서 Event1의 경우, Inlet1과 Inlet2의 유입 유속 기준으로 볼 때, 입자의 transportation이 비교적 강하게 일어날 것으로 예상할 수 있으며, Event2의 경우에는 Inlet1과 Inlet2 모두 유입 유속이 20 cm/sec 이하로서 입자의 deposition이 상대적으로 크게 발생할 것으로 예상할 수 있다.

강우 직후 습지의 평균 체류시간은 2.2 hr (Event1)와 4.2 hr (Event2)로 계산되어 습지의 적정 운영을 위한 최초 설계기준 (1일)보다 크게 짧은 것을 확인하였다. 습지로 유입되는 SS 농도는 84 (Event1)와 72 (Event2) mg/L였으며, 직경 10-50 μ m의 크기를 갖는 입자가 전체의 95 % 이상 (부피기준)을 차지하는 것으로 조사되었다. 이는 강우 시 유출되는 입자의 대부분이 10-50 μ m 범위인 것으로 보고한 선행 연구 결과와도 일치한다 (Lim and Lee, 2007; Cho et al., 2007; Lee, 2008). 본 연구에서 수행한 CFD 해석은 Table 1에 제시한 실제 습지 운영 분석 자료를 바탕으로 수행되었다.

2.3. CFD 적용 및 해석방법

CFD 해석을 위해 Fig 1.에 제시한 3차원 형상을 바탕으로 유체영역을 추출하여 격자 (mesh)

를 생성하였다. 격자의 크기는 80-600 mm로 설정하였으며, 유체와 접하는 벽면 주위는 가급적 작은 크기의 격자로 구성하였고, 유체가 지나가는 대부분의 영역은 600 mm의 일정한 크기를 갖는 tetrahedra 형태의 격자로 구성하였다. 유입부와 유출부는 pyramids, wedges 형태의 격자를 사용하여 경계구역이 되도록 설정하였다. 이렇게 생성된 총 격자의 개수는 312,318 개였다.

CFD 해석을 위한 난류모델로서 Shear Stress Transport (SST) 모델을 사용하였으며, 입자상물질의 침적을 예측을 위해 Algebraic Slip Model (ASM)을 사용하여 하나의 유체 속 혼합물체로 입자상물질을 표현하였다. 유체는 Free slip 조건을 주어 자유수면 상태로 설정하였고, 벽면은 No slip 조건으로 설정하였다. 인공습지의 바닥면 역시 No slip 조건을 주어 입자가 바닥에 닿으면 침적, 제거되는 것으로 간주하였으며, 입자의 재부유 현상은 고려하지 않았다. Outlet 부분은 대기압으로 설정하여 유체가 자연유하 될 수 있도록 하였다.

2.4 분석방법

인공습지 내 부유성 고형물의 입도분포 (particle size distribution, PSD)는 Particle Size Analyzer (SediGraph 5100, Micromeritics Instrument Co., USA)를 이용하여 분석하였다. 입도 분석은 0.1-100 μ m 범위에서 실시되었으나 본 연구에서는 10 μ m 이하의 크기를 갖는 입자의 부피 분포 결과만 추출하여 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 습지 내 수평유속분포 및 사류영역 평가

수평 유속 분포 파악을 위해 습지 내부를 총 5개의 단면으로 분할한 뒤, 각각의 단면에서 수평 방향의 유속벡터만 추출하였다. 본 연구에서 선택한 Y 인공습지의 경우 평균수심이 0.3 m, 최

대수심이 1.0 m이었으며 수평유속 해석을 위해 추출된 단면 중, 습지 최하부 바닥에서 0.8 m 이상에 해당하는 단면에서만 습지 전체의 수평유속분포가 얻어질 수 있었다. Fig. 2에 습지 최하부 바닥에서 0.8 m 상부지점에서의 수평유속분포를 제시하였다.

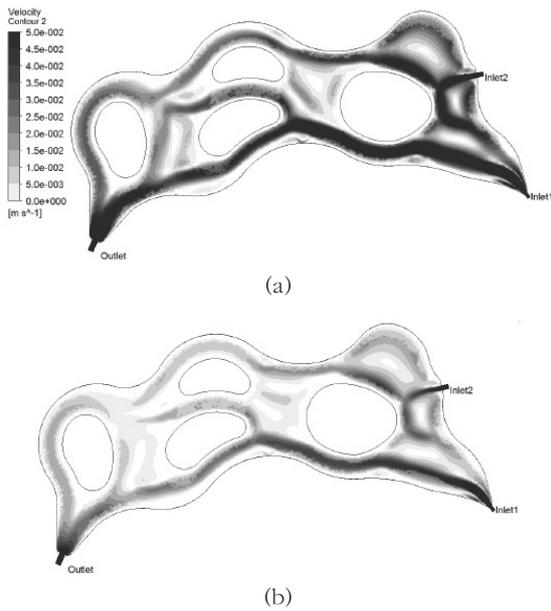


Fig. 2. Horizontal velocity distribution of the constructed wetland with an averaged HRT of 2.2 hr (a) and 4.2 hr (b)

예상대로 습지 내 평균 HRT가 2.2 hr일 경우 전반적인 유속분포가 높은 것으로 나타났으며, 평균 HRT가 4.2 hr일 경우에는 Inlet1 초입부를 제외하면 대부분 5 cm/sec 이하의 유속을 갖는 것으로 확인되었다. 따라서 HRT 4.2 hr 이상으로 습지가 운영될 경우, Hayes et al. (2000)의 이론에 따라 100 μm 이하의 직경을 갖는 대부분의 silt나 clay 성분들은 deposition이 강하게 일어날 것으로 판단된다. Fig. 2에서 Inlet1으로 유입될 경우, 유속분포가 전반적으로 빠른 것으로 확인되었으며, 이는 Inlet1의 경우, Inlet2에 비해 인공섬에 의한 유체의 흐름 방해가 적기 때문이다.

인공섬지 내부에는 단락류와 같은 유체의 비이상적 흐름을 방지하고 산소공급 및 야생식물과 조류 서식처 제공 등 습지의 시각적 경관 향상을 위해 중도를 설치하는 경우가 많다 (Choi, 2008). 이러한 중도에 의한 단락류 형성 감소는 유입된 유체가 습지 내에 고루 분포하게 하여 오염물제거에 효과적으로 작용한다. 그러나 과도한 인공섬의 설치와 비정상적인 형태의 인공섬은 습지에 사류영역을 발생시키게 되고 이는 습지에 유입된 유체의 정체를 유발하여 부패와 악취발생과 같은 문제를 초래한다. 따라서 인공섬지에서 사류영역을 파악하는 것은 습지의 완성도 제고를 위해 매우 중요한 요소 중 하나라 할 수 있다 (Choi et al., 2007).

Hannoun et al. (1998)은 사류지역을 정수지내 직선부, 곡선부에서 유출부로 흐르는 평균적 흐름의 반대 방향인 영역으로 정의하였고, Thackston et al. (1987)은 유체의 전체 평균 유속과 비교했을 때, 10 % 미만의 유속을 가지는 영역을 사류영역으로 정의하였다. Lee et al. (2007)은 이와 같은 두 가지 정의를 바탕으로 정수지내 사류영역을 평가하기 위해 부피율 개념을 사용하였다. 본 연구에서는 평균유속의 10 % 미만의 유속을 가지는 영역을 사류영역으로 정의하고, 이 영역을 포함하는 mesh의 부피분율(P_D)을 계산하여 사류영역의 비율을 식 (1)과 같이 정량화 하였다.

$$P_D = \frac{V_D}{V_T} \times 100 \quad (1)$$

여기서,

P_D : Dead zone volume percentage(%)

V_D : Dead zone volume(m^3)

V_T : Total wetland volume(m^3)

평균유속의 10 % 미만으로 확인된 cell mesh의 전체 부피(V_D)를 계산한 결과 HRT 2.2 hr일 경우 45 m^3 , HRT 4.2 hr일 경우에는 27 m^3 으

로 분석되었다. 이렇게 계산된 V_D 와 식 (1)을 이용하여 P_D 를 계산한 결과 HRT 2.2 hr와 4.2 hr 일 경우 각각 2.1 %와 1.2 %로 나타났다. 따라서 HRT가 짧아질수록 유속이 전반적으로 증가하고, 이는 인공습지 내 유속차이에 의해 사류 발생 가능성을 증가시킬 수 있음을 확인하였다. Fig. 3에 각 HRT 별로 평균유속의 10 % 미만을 나타내는 사류영역을 제시하였다.

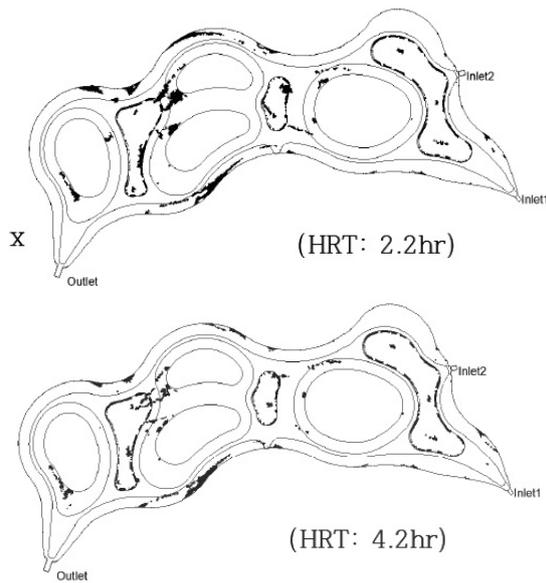


Fig. 3. Estimated results of dead zone of Y constructed wetland

3.2. 습지 내 고형물 침적률 (Solids deposition rate) 분석

인공습지가 침강저류지, 얇은 습지, 깊은 습지, 침전지 등과 같이 다양한 형상으로 구성되어 있을 경우 침강저류지를 습지의 앞단에 배열 하는 것이 가장 좋은 수질정화 효과가 나타난다고 알려져 있다. 이는 입자상 물질의 대부분이 초입 침전지에서 제거되기 때문이다 (U.S. EPA, 2000).

본 연구에서 해석한 Y 인공습지의 경우, 침강저류지, 습지, 후단침전지로 구성되어있다. 여기서 침강저류지는 유입구로 유입된 입자성

물질을 1차적으로 침전시키는 역할을 한다. 후단 침전지는 입자성물질의 재부유 방지를 위해 설치되어 있다. 침강저류지에서는 입자성 물질이 침적되는 동시에 영양물질의 일부가 입자성 물질에 흡착되어 함께 제거 된다 (U.S. EPA, 2000). 이러한 이유로 초입 침전지의 적절한 설계는 인공습지 전체의 수질정화 효율에 많은 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 인공습지에서 입자상 물질 제거효율 평가를 위해 고형물 침적률 (R_s) 개념을 도입하였으며 이에 대한 정의는 식 (2)와 같다.

$$R_s = \frac{M_p}{A_b} \quad (2)$$

여기서,

R_s : Solids deposition rate (kg/m²/sec)

M_p : Particle mass removal rate at the bottom cell (kg/sec)

A_b : Bottom area of a cell mesh (m²)

Cho et al. (2007)의 연구에 의하면 강우 시 교량도로 유출수에는 10-20 μm의 크기를 갖는 입자가 대부분이나 합류식 하수도 월류수의 경우 100 μm 전후의 비교적 큰 입자가 상당량 존재한다 하였다. 또한 Lim and Lee (2007)는 다양한 물 환경에서 2-6 μm 범위의 입자가 대체적으로 많이 존재한다 하였고, 40-50 μm 이상의 입자는 비교적 쉽게 침강하기 때문에 부유 상태로 존재하는 경우는 드물다고 하였다. 이러한 선행 연구결과들에 근거하여 10-50 μm의 크기를 갖는 입자를 주요 해석 대상으로 설정하여 평가하였다. HRT 2.2, 4.2 hr일 경우 입자크기별 R_s 예측결과를 Fig. 4와 5에 각각 제시하였다.

입자의 직경이 커질수록 R_s 값은 대체적으로 증가하고 침적이 유입부에 가까운 쪽에서 많이 일어나며, 이는 체류시간이 커질수록 보다 명확해진다. 10 μm의 직경을 갖는 입자의 경우 습지 전반에 걸쳐 유사한 침적율을 보이며 체류시간

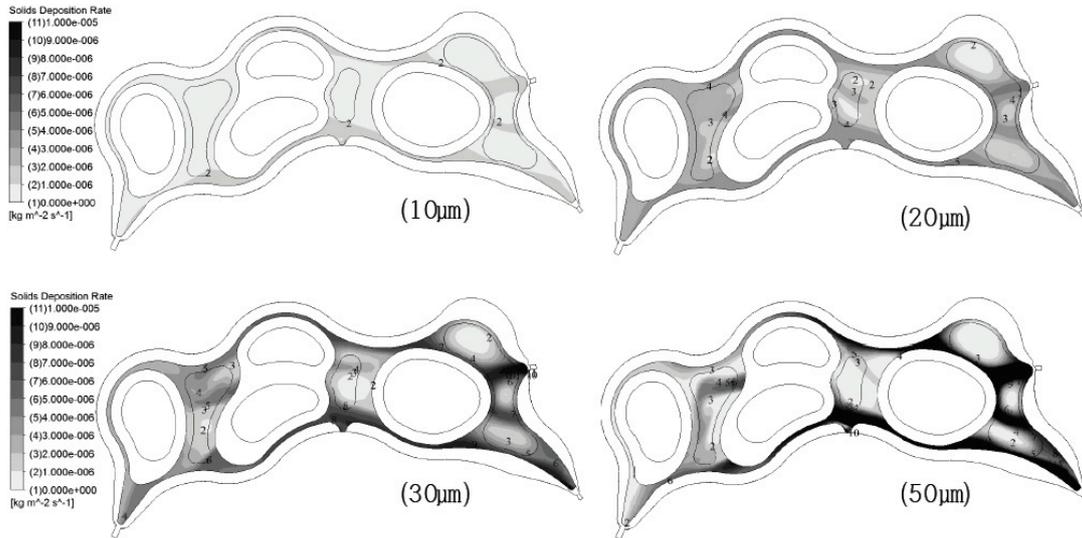


Fig. 4. Distribution of solids deposition rate (R_s) (HRT: 2.2hr)

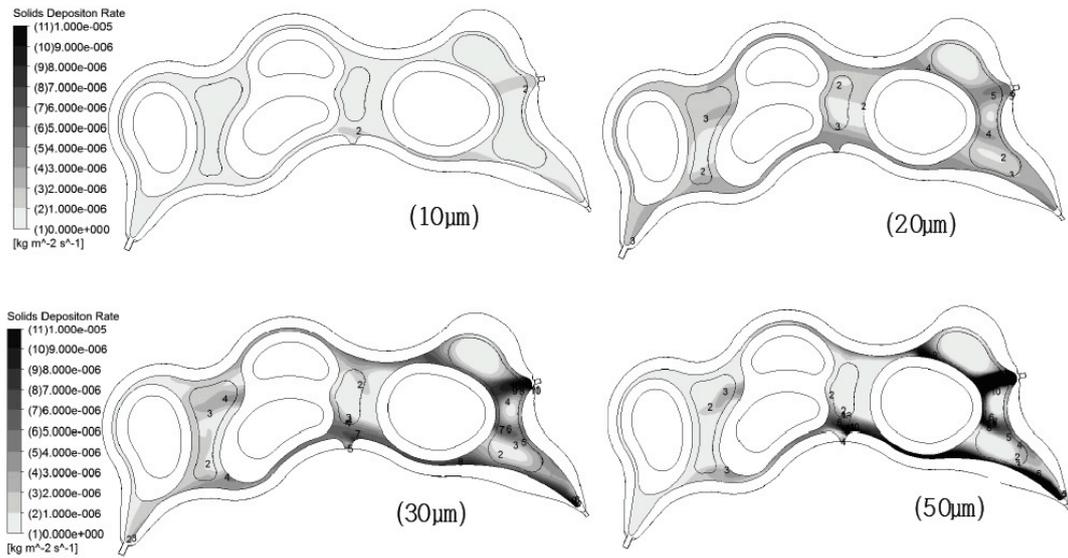


Fig. 5. Distribution of solids deposition rate (R_s) (HRT: 4.2hr)

변화에도 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. Fig. 4와 5에 제시한 R_s 값을 활용하여 습지에서 입자 제거효율 (E_p)을 식 (3)과 같이 단위시간당 침전지 바닥에 침적·제거되는 입자의 총량을 단위시간당 유입되는 입자의 총량으로 나눈 값으로 정의하였다.

$$E_p = \frac{\int R_s \cdot dA_b}{Q_i \cdot C_p} \times 100 \quad (3)$$

여기서,

E_p : particle removal efficiency (%)

Q_i : influent flowrate of the constructed wetland (m^3/sec)

C_p : particle concentration in the influent (kg/m^3)

Table 2에 제시한 것과 같이 HRT에 관계없이 입자의 크기가 증가할수록 제거효율이 크게 증

가하는 것을 알 수 있으며, 50 μm 입자의 경우에는 90 % 이상의 제거효율을 나타내어 Lim and Lee (2007)의 실험결과와 유사한 것으로 확인되었다. 따라서 인공습지에 50 μm 보다 큰 입자가 유입될 경우, 대부분 3시간 이내에 침적·제거될 수 있을 것으로 판단된다. Table 2로부터 습지의 HRT 증가는 20–30 μm 크기의 입자 제거율 향상(약 20 %)에 큰 도움이 되는 것으로 확인되었으며, 10 μm 크기의 입자는 약 10 %의 제거효율 향상으로 이어졌다.

Table 2. Estimated removal efficiencies of the particles between 10 to 50 μm in diameter

Size(μm)	(HRT: 2.2 hr)				(HRT: 4.2 hr)			
	10	20	30	50	10	20	30	50
E_p (%)	16.8	46.6	68.2	94.5	26.3	67.2	88.1	99.4

3.3. CFD해석결과 검증

Table 3에 본 연구에서 해석한 Y 인공습지의 HRT 변화에 따른 직경 10 μm 이하의 입자분석 결과와 제거효율 평가결과를 CFD를 통한 이론적 해석 결과와 비교하여 제시하였다. 10 μm 보다 큰 입자의 경우 습지 유출부에서 거의 존재하지 않는 것으로 확인되어 이론적 해석결과와의 비교·검토에서 제외하였다. 인공습지에서의 입도분석은 HRT 2.2와 4.2 hr일 경우 이외에도 비강우시의 HRT 8.3과 12.8 hr일 경우도 포함하여 실시하였고, 그 결과를 Table 3에 함께 제시하였다.

Table 3. Volume distribution and removal efficiency of the particles smaller than 10 μm in diameter

HRT (hr)	Particle volume ($\times 10^3 \mu\text{m}^3/\text{ml}$)		Removal efficiency (%)	
	Influent	Effluent	Experimental	CFD analysis
2.2	3.92	2.95	24.7	16.8
4.2	3.24	2.23	31.2	26.3
8.3	1.88	0.98	47.6	42.9
12.8	1.99	0.57	71.2	64.7

직경 10 μm 이하의 크기를 갖는 입자가 유입수에서 차지하는 부피는 HRT 2.2와 4.2 hr일 경우 모두 $3.0 \times 10^3 \mu\text{m}^3/\text{ml}$ 를 초과하는 것으로 분석되어 강우 시 상대적으로 많은 양의 clay 성분이 습지로 유입되는 것을 알 수 있다. 반대로 비강우시 (HRT 8.3과 12.8 hr)에는 유입수에서 10 μm 이하의 입자가 차지하는 부피가 $2.0 \times 10^3 \mu\text{m}^3/\text{ml}$ 이하인 것으로 분석되었다. 이렇게 분석된 결과를 바탕으로 습지에서 10 μm 이하의 크기를 갖는 입자의 제거효율을 계산하면 HRT 변화에 따라 24.7–71.2 %로 확인되었으며, HRT의 증가에 따라 제거효율이 급격히 상승하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 CFD 해석결과(16.8–64.7 %)에서도 유사하게 나타났다. 다만 CFD를 이용한 이론적 해석에서는 제거율이 모든 HRT에서 일률적으로 낮게 나타났는데, 이는 CFD 해석시 10 μm 입자만 단독으로 사용된 점, 그리고 실제 습지의 경우 식생의 존재로 인해 미세부유입자가 추가적으로 제거되었을 가능성이 높은 점 등이 그 원인이라고 판단된다. 이론적으로 도출된 입자 제거효율의 HRT별 경향이 실제 분석결과와 매우 유사한 것으로 나타나 인공습지 해석에 있어서 CFD에 의한 입자제거효율 예측은 향후 습지 설계에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 매우 짧은 HRT (2.2–4.2 hr)를 가지는 소형 인공습지에 대하여 습지 내부의 사류영역 발생 가능성을 CFD 해석을 통하여 예측하였다. 그 결과, 상기 HRT 변화에 대하여 전체 습지 체적의 약 1.2–2.1 %가 사류구간으로 존재하는 것으로 예측되었다. 또한 HRT가 증가함에 따라 사류구간 발생비율은 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 10–50 μm 의 직경을 갖는 입자가 습지 내부에 침적·제거되는 효율을 예측한 결과 HRT와 입자의 직경이 증가할수록 침적·제거율도 함께 증가하였다. 50 μm 크

기의 입자는 90 % 이상의 제거율을 나타내었으며, 입자의 직경이 감소할수록 제거효율은 급격히 감소하여 10 μm 입자의 경우 16.8-26.8 %의 제거효율을 갖는 것으로 예측되었다. 이론적 제거효율은 실제 제거효율에 비해 다소 낮은 것으로 나타났으나, HRT 변화에 따른 경향은 매우 유사한 것으로 확인되었다.

사 사

본 논문은 2010년도 대구대학교 학술연구비 지원 (과제번호 20100394)에 의해 수행되었음.

참고문헌

- Cho Y.J., Lee J.H., Bang K.W. and Choi C.S. (2007) Water quality and particle size distributions of bridge road runoff in storm event, *J. KSEE*, **29**(12), pp. 1353-1359.
- Choi D.H., Choi K.S., Kim S.W., Oh Y.T., Kim D.S., Joh S.J. and Park J.C. (2007) Water flow distribution and sedimentation characteristics of particle materials in the Sihwa constructed wetland, *J. KSEE*, **29**(4), pp. 425-437.
- Choi, J.Y. (2008) Efficiency increases for artificial wetlands to reduce nonpoint source pollution, *Kyonggi Forum*, **10**(2), pp. 163-181.
- Hannoun I.A., Bouls F. and List J. (1998) Using hydraulic modeling to optimize contact time, *J. AWWA*, **90**(8), pp. 77-87.
- Hayes D.F., Olin T.J., Fischenich J.C. and Palermo M.J. (2000) *Wetlands Engineering Handbook*, ERDC/EL TP-WRP-EW21, U.S. Army Corps of Engineers: Washington, D.C., p. 719.
- Jang J.R., Lee K.S., Choi S.H. and Choi J.H. (2004) The characteristics of pollutant removal of a free water surface constructed wetland established at estuary reclamation are, *Proceedings of 2004 Joint Conference by KSWW & KSWE*, pp. 16-24.
- Kadlec R.H., Bastiaens W. and Urban D.T. (1993) *Constructed wetland for water quality improvement: Hydrological design of free water surface treatment wetlands*, Lewis Publishers, pp. 77-82.
- Koskiaho J. (2003) Flow velocity retardation and sediment retention in two constructed wetland-ponds, *Ecologic. Eng.*, **19**(5), pp. 325-337.
- Lee H.S. (2008) Runoff characteristics of storm-water runoff in urban area, *M.S. Thesis*, Kumoh National Institute of Technology.
- Lee S.J., Shin E.H., Kim S.H. and Park H.K. (2007) The effect of dead zone on hydraulic efficiency in clearwell, *J. KSWW*, **21**(2), pp. 177-185.
- Li Y., Deletic A. and Fletcher T.D. (2007) Modelling wet weather sediment removal by stormwater constructed wetlands: Insights from a laboratory study, *J. of Hydrology*, **338**(3-4), pp. 285-296.
- Lim Y.J. and Lee D.G. (2007) A study on the various water environments using particle size distribution measurement - Focused on river water, lake water and sea water, *Proceedings of 2005 Joint Conference by KSWW & KSWE*, pp. 81-89.
- Reed, S.C., Crites, R.W., and Middlebrooks E.J. (1995) *Natural systems for waste management*, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, USA, pp. 173-284.
- Thackston E.L, Shields Jr.F., Douglas Jr. and Schroeder P.R. (1987) Residence time distributions of shallow basins, *J. Environ. Eng.*, **113**(6), pp. 1319-1332.
- Urban D.T. (1990) Methods of determining residence time distribution in a reconstructed wetland, *M.S. Thesis*, Illinois institute of technology, pp. 69-72.
- U.S. EPA (2000) *Constructed wetlands treatment of municipal wastewaters*, EPA/ 625/R-99/010.
- Walker D.J. (1998) Modelling residence time in stormwater ponds, *Ecologic. Eng.*, **10**(3), pp. 247-262.