韓國水資源學會論文集
第47卷 第5號·2014年 5月
pp. 483~490

J. KOREA WATER RESOURCES ASSOCIATION
Vol. 47, No. 5:483-490, May 2014
http://dx.doi.org/10.3741/JKWRA.2014.47.5.483
pISSN 1226-6280 • eISSN 2287-6138

슬러지 농도 최적화에 따른 합리적인 활성슬러지공정 설계방안 연구

Economic Design of Activated Sludge System at the Optimum Sludge Concentration

이 병 준* / 최 윤 영**

Lee, Byung Joon / Choi, Yun Young

Abstract

The design procedures for a biological reactor and a secondary settling tank (SST) of an activated sludge system are based on the steady state design method (Ekama et al., 1986; WRC, 1984) and the 1-D flux theory design method (Ekama et al., 1997), respectively. This study combined both of the design procedures, to determine the optimum sludge concentration in the reactor and the best design with the lowest cost. The best design of the reactor volume and the SST diameter at the optimum sludge concentration were specified with varying wastewater and sludge characteristics, temperature, sludge retention time (SRT) and peak flow rate. The effects of the influent wastewater characteristics, such as substrate concentration and unbiodegradable particulate fraction, were found to be considerable, but the effect of unbiodegradable soluble fraction was to be negligible. The effects of sludge settling characteristics, were also significant. SRT, as an operating parameter, was found to be an important factor for determining the optimum sludge concentration. However, the effect of temperature was found to be small. Furthermore, for designing a large scale wastewater treatment plant, the number of reactors or SSTs could be estimated, by dividing the total reactor volume or SST area. The new combined design procedure, proposed in this research, will be able to allow engineers to provide the best design of an activated sludge system with the lowest cost.

Keywords : activated sludge, biological reactor, secondary settling tank, optimum design

요 지

활성슬러지 공정의 생물학적 반응조 및 2차 침전지 설계와 관련해서 정상상태 설계식(Ekama et al., 1986; WRC, 1984) 및 1-D flux theory 설계식(Ekama et al., 1997)을 사용하여 슬러지 농도에 따라 두 가지 공정을 일괄적으로 설계하였다. 또한, 슬러지 농도에 따른 생물학적 반응조 및 2차 침전지 크기 변화를 도식화하고, 유입수 성상이나 슬러지 침강성, 환경 및 운전조건 그리고 첨두유량이 각 공정의 크기결정에 미치는 영향을 평가하였다. 먼저 유입수의 특성과 관련하여 난분해성 용해성 물질(fs,us)은 반응조 크기 결정에 큰 영향이 없었지만, 난분해성 입자성 물질(fs,up), 무기 고형물(fi) 및 유기물 강도(Sti)의 영향은 크게 나타났다. 운전인자인 Sludge Retention Time (SRT)의 경우, 슬러지 생산량과 관련되므로 반응조 크기결정에 역시 큰 영향을 미쳤다. 2차 침전지의 설계요소인 Sludge Volume Index (SVI) 및 첨두유량이 커질수록 2차 침전지에 수리학적 부하가 커지게 되어, 2차 침전지가 크게 설계되어야 했다. 본 설계과정에서는, 온도 변화가 미치는

* 경북대학교 과학기술대학 건설방재공학부 조교수(e-mail: bjlee@knu.ac.kr)
Assistant Professor, School of Construction and Environmental Engineering, Kyungpook National University, 2559 Gyeongsang-daero, Sangju, Gyeongbuk 742-711, Korea

** 교신저자, 경북대학교 과학기술대학 건설방재공학부 부교수(e-mail: yunchoi@knu.ac.kr, Tel: 82-54-530-1443, 1449)
Corresponding Author, Assistant Professor, School of Construction and Environmental Engineering, Kyungpook National University, 2559 Gyeongsang-daero, Sangju, Gyeongbuk 742-711, Korea

영향은 작게 나타났다. 대규모 처리장의 경우 반응조 및 2차 침전지 전체 크기 결정과 함께 1개조 크기의 상한선을 설정하여 개수를 산정하였다. 최종적으로 엔지니어는 여러 가지 슬러지 농도에 대하여 반응조 및 2차 침전조의 크기, 개수 및 현장조건을 고려한 건설비용을 반복적으로 계산하게 되면, 최소비용 설계와 함께 최적의 슬러지 농도를 결정하게 된다.

핵심용어 : 활성슬러지, 생물학적 반응조, 2차 침전지, 최적 설계

1. 서 론

활성슬러지 공정은 생물학적 반응조와 2차 침전지로 구성이 된다. 활성슬러지 공정의 총 슬러지 생산량은 유입유기물 부하와 SRT 등과 관련하여 결정이 되고, 이를 반응조 크기에 따라 희석하면 유지 슬러지 농도가 결정된다. 만약 생물학적 반응조의 부피가 크다면 슬러지 농도를 낮게 유지할 수 있으므로 2차 침전지에서 고형물에 의한 수리학적 부하가 낮아지고 따라서 2차 침전지의 크기가 작아진다. 만약 생물학적 반응조의 부피가 작아진다면 반대의 현상이 일어나게 된다. 이와 같이 생물학적 반응조와 2차 침전지의 설계는 슬러지 농도로써 밀접하게 연관되어 있다. 최근 활성슬러지 공정 2차 침전지 설계와 관련하여, (1) 경험식, (2) 1차원 Flux Theory에 기반한 설계식, (3) 2, 3차원 전산수리학(Computational Fluid Dynamics)에 기반한 설계식까지 다양하게 개발되었다(Henze et al., 2008). 그러나 대부분의 설계과정(e.g. KWWA, 1998; Randall et al., 1992; Metcalf and Eddy, 1991)에서는 상호 연관성을 무시하고 슬러지 농도를 경험적으로 얻어진 설계기준에 따라 정하고 있다. 가령, Randall et al. (1992)의 설계기준에 따르면 슬러지 농도를 재래식 활성 슬러지 공정의 경우 1,500~3,000 mgMLSS/ℓ 사이에서 임의의 값을 미리 설정하고, 이를 바탕으로 반응조 및 2차 침전지 크기를 결정하게 된다. 그러나 활성슬러지 공정은 슬러지 농도에 따른 두 공정의 상호 연관성을 파악하고, 최적의 슬러지 농도를 결정과 함께 일괄적으로 설계됨이 바람직하다. 생물학적 반응조 및 2차 침전지의 크기는 슬러지 농도를 매개로 상호 연관되어 있고, 더 자세히는 유입수의 성상(e.g. fs,us: unbiodegradable soluble COD fraction, fs,up: unbiodegradable particulate COD fraction, fi: MLVSS/MLSS ratio), 슬러지의 침강성(e.g. SVI: sludge volume index, DSVI: diluted SVI), 환경조건(e.g. temperature) 및 운전조건(SRT: sludge retention time)에 따라 달라질 수 있다. 또한 강우시의 첨두유량에 의해 2차 침전지에 수리학적 부하율이 증가하므로 설계에 영향을 미칠 수 있다. 즉, 여러 가지 현장 조건들에 의하여 최적의 유지 슬러지 농도가 달라지고, 최적의 생물학적 반응조 및 2차 침전지의 설계가 달라지게 되는 것이다. 하지만, 기존 활성슬러지 공정 설계법은 슬러지 농도 및 농도부하를 경험적 설계범위에서 결정하므로, 위에서 소개된 다양한 설계인자들의 상호작용을 반영할 수 없다. 활성슬러지 공정에서 생물학적 반응조와 2차 침전지의 설계가 유지 슬러지 농도로 밀접히 관련되는 점 및 다양한 조건들이 공정 설계에 영향을 미치는 점을 고려하여 최소비용의 최적설계(Cost Optimization)가 바람직하다. 따라서, 본 연구는 생물학적 반응조 및 2차 침전지 용적(또는 건설비용)을 종속변수로 두어, 두 변수간 또는 다양한 설계인자들의 상호연관성을 반영할 수 있는 설계식을 개발하였다. 새로운 설계식은 기존의 경험적 설계식과 달리 공학적 기본원리를 바탕으로 하며, 향후 활성슬러지 공정의 생물학적 반응조 및 2차 침전지 최적설계, 운영에 사용될 수 있다.

2. 실험방법

활성슬러지 공정의 슬러지농도(mgMLTSS/ℓ)에 따른 반응조와 2차 침전지의 크기결정을 위해 정상상태 설계식(WRC, 1984) 및 1-D flux theory 설계식(Ekama et al., 1997; Jenkins et al., 1984)을 사용하였다. 이들 설계식은 앞서 언급한 다양한 현장 조건들(유입수 성상, 슬러지 침전성, 첨두유량 등)을 포함하게 된다.

2.1 생물 반응조의 설계식

정상상태에서의 활성슬러지 생산량은 Ekama et al. (1986), WRC (1984)의 설계식으로 계산되었다. WRC (1984)에 따르면 총 슬러지(MLTSS) 생산량은 Eqs. (1), (2) and (3)에 의해 계산된다. 여기에서 도시하수 처리를 위한 활성슬러지 공정에서의 질산화 미생물 분량(MX_{BA})이 2% 이하로 매우 낮게 나타나므로 (Wentzel et al., 1995) 계산에서 제외되었다. Eq. (3)에서 계산된 총 슬러지 량(MX_t)을 슬러지 농도(mgMLTSS/ℓ)로 나누게 되면 반응조 부피를 결정하게 된다.

$$MX_V = MX_{BH} + MX_E + MX_I \quad (1)$$

$$MX_V = MS_{ti}\left[\frac{(1-f_{S,us}-f_{S,up})Y_H R_s}{1+b_{HT}R_s}(1+fb_{HT}R_s)+\frac{f_{S,up}}{f_{cv}}R_s\right] \quad (2)$$

$$MX_t = MX_v / f_i \quad (3)$$

여기서,

MX_V= mass of volatile suspended solids (mg VSS)

MX_{BH}= mass of OHO active biomass (mgVSS)

MX_E= mass of endogenous material (mgVSS)

MX_I= mass of inert material (mgVSS)

MS_{ti}= Influent Substrate Loading (mgVSS/d)

f= fraction of endogenous residue of active biomass=0.2 (-) (Dold et al., 1980).

b_{HT}= specific endogenous mass loss rate at T ℃ (/d)=b_{H20}*1.029$^{(T-20)}$

b_{H20}= 0.24 (/d) at 20℃ (endogenous respiration theory; Dold et al., 1980)

R_S= system sludge age (d)

$f_{S,up}$= fraction of influent substrate that is unbiodegradable particulate (-)

$f_{S,us}$= fraction of influent substrate that is unbiodegradable soluble (-)

f_{cv}= COD to VSS ratio of organic suspended solids (mgCOD/mgVSS)

Y_H= Biomass yield, VSS units=0.45 (mgVSS/mg COD) (WRC, 1984)

2.2 2차 침전지 설계식

2차 침전지 설계는 1-D flux theory 설계식(Ekama et al., 1997)을 사용하였다. Ekama et al. (1997)에 따르면 슬러지 반송률이 일정한계를 넘어서면 2차 침전지의 설계는 전적으로 (1) 슬러지 침강성과 함께, (2) 생물학적 반응조로부터 유입되는 고형물 및 유량에 의한 표면 부하율을 따르므로 설계식을 간단화할 수 있다. 본 연구에서는 슬러지 반송률이 Ekama et al. (1997)이 제시한 일정 한계점를 넘어선 것으로 가정하여, Eq. (4)와 같이 2차 침전지의 표면적을 구할 수 있다.

$$A_{ST} = \frac{1000 f_q Q_{i,adwf}/24}{0.8\, V_o e^{-n X_t}} \quad (\mathrm{m}^2) \quad (4)$$

여기서,

V_o & n= constants of zone settling velocity (m/s & -)

f_q= PWWF (Peak Wet Weather Flow)/ADWF (Average Dry Weather Flow) ratio (-)

$Q_{i,adwf}$= Influent flow rate (Mℓ/d; 1000 m^3/d)

X_t= Mixed Liquor TSS (mgTSS/ℓ)

0.8= 25% safety factor (1/0.8)

1000, 24= unit conversion factors

V_o와 n값의 경우 실측이 바람직하지만 현장에서는 편의상 대부분의 경우 SVI (Sludge Volume Index)를 슬러지 침강성의 지표로 사용하기 때문에 본 연구에서는 Ekama et al. (1997)이 제시한 회귀 분석식(Eqs. (5) and (6))을 이용하여 계수 값들을 구하였다. 최종적으로 구해진 표면적은 직경으로 환산하게 된다.

$$V_o = 8.531 e^{-0.00165(SVI)} \quad (5)$$

$$n = 0.20036 + 0.00091(SVI) \quad (6)$$

본 연구에서는 spread sheet (Corel Quatro Pro®)로 작성된 프로그램을 활용하여 슬러지 농도에 따른 생물 반응조 및 2차 침전지 크기 변화를 도식화하여 유입수 성상이나 슬러지 침강성, 환경 및 운전조건 그리고 강우시 첨두유량이 각 단위공정의 크기에 미치는 영향을 평가하였다. Table 1은 필요 계수들의 대표값과 각 계수들이 미치는 영향을 파악하기 위해 프로그램에서 적용한 값의 변동범위를 보여주고 있다. 유입수 성상인 $f_{S,us}$, $f_{S,up}$, f 및 S_{ti} 그리고 2차 침전지의 수리학적 부하에 영향을 주는 SVI (Sludge Volume Index), 환경조건인 온도, 운전조건인 SRT 그리고 f_q (첨두유량/평균유량 비)를 각각 변화시켜 반응조 유지 슬러지농도(mgMLTSS/ℓ)의 변화에 따른 생물학적 반응조 및 2차 침전조의 크기변화를 계산, 도식화하였다. 특정 계수에 의한 독립적인 영향을 파악하기 위해 나머지 값은 Table 1의 대표값을 사용하고, 특정 계수 값만을 변화하여 계산을 수행하였다.

Fig. 1은 Corel Quatro Pro® (spread sheet program)으로 작성된 프로그램의 알고리즘을 보여주고 있다. 먼저 Data Collecting 단계에서 활성슬러지공정의 설계 및 운영인자들을 조사하고, 여러 가지 자료들은 spread sheet 프로그램의 Input Data로 입력하게 된다. 계산단계에서는, Eqs. (1)~(3)에 의거하여 총 슬러지 발생량(MX_t)을 계산하고, Eqs. (5) and (6)에 의거하여 슬러지 침강특성(V_o, n)을 계산한다. 마지막으로, 슬러지 농도(X_t)를 독립변수로 두고 이에 따른 반응조 및 2차 침전조의 크기를 계산한다. 여기에서 Cost Optimization이라 함은 최소 비용으로 건설할 수 있는 반응조 및 2차 침전조의 크기를 의미한다. 다양한 설계 및 운영인자들을, 미리 소개한 계산과

Table. 1 Input Data for Calculation of Bioreactor and SST Sizes

Parameters	Values	Applied Range	Units	References
fs,us	0.10	0.05~0.2	-	Choi (2001): 0.125, Park (2002): 0.10, Ha (2002):0.137
fs,up	0.1	0.05~0.2	-	Choi (2001): 0.125, Park (2002): 0.10, Ha (2002): 0.03
fi	0.80	0.70~0.90	gVSS/gTSS	WRC(1984): 0.75 (원수), 0.85 (1차 침전수)
Sti	200	150~300	mgCOD/ℓ	Choi (2001): 200
Qi,adwf	3000 10000	-	m^3/d	반응조, 2차 침전지 각 1지의 소규모 처리장 반응조, 2차 침전지 다수인 대규모 처리장
$V_{Reactor}$	3000	-	m^3	다 반응조의 1개지 크기 (e.g. DNR 공정 기본설계서(Daewoo, 1998): 3000)
$A_{SST}(\Phi)$	707 (30)	-	m^2 (m)	다 침전조의 1개지 크기 (e.g. DNR 공정 기본설계서(Daewoo, 1998): 16.4)
Temp	20	10~25	℃	
Rs	20	10~30	d	
fq	3	2~4	-	KWWA (1998): 3
SVI	200	100~250	mℓ/g	Ha (2002): 125(평균), 200(최대)

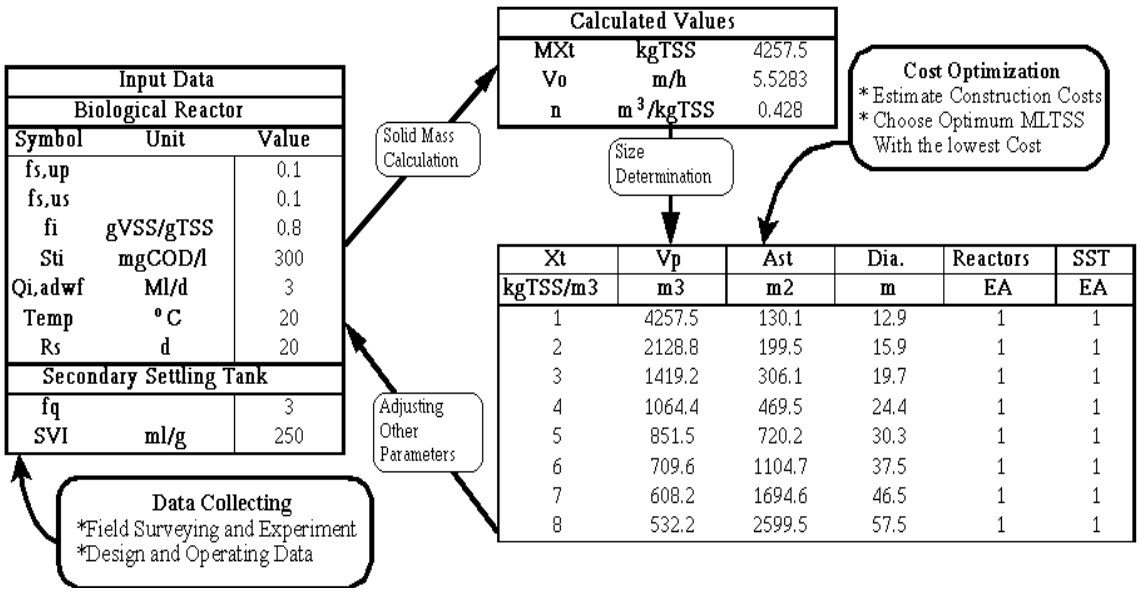

Fig. 1. Development of Spread Sheet Program to Determine Optimum Sludge Concentration

정에 적용하여, 최소비용의 최적설계를 이루어 낼 수 있다. 유량이 큰 대규모 처리장의 경우, 반응조 및 2차 침전지 크기의 상한선을 설정하여 그 크기가 상한선을 넘게 되면 여러 개로 나누었다(Table 1). 따라서 대규모 처리장에서 반응조 및 2차 침전조에 대해서 반응조 유지 슬러지 농도에 따라 반응조 및 2차 침전조의 크기 및 개수의 변화까지 계산하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 유입수 성상 및 슬러지 침강성에 의한 영향

Fig. 2에 나타나듯이, 일반적으로 슬러지농도(MLTSS)를 높게 설정하면 반응조 크기(Reactor Volume)는 줄어들지만(*i.e.* L-shaped curve), 고형물 부하가 증가하기 때문에 2차 침전조 크기(SST Diameter)는 늘어나게 된다(*i.e.* *J*-shaped curve). 그리고 각 유입수 성상이 반응조

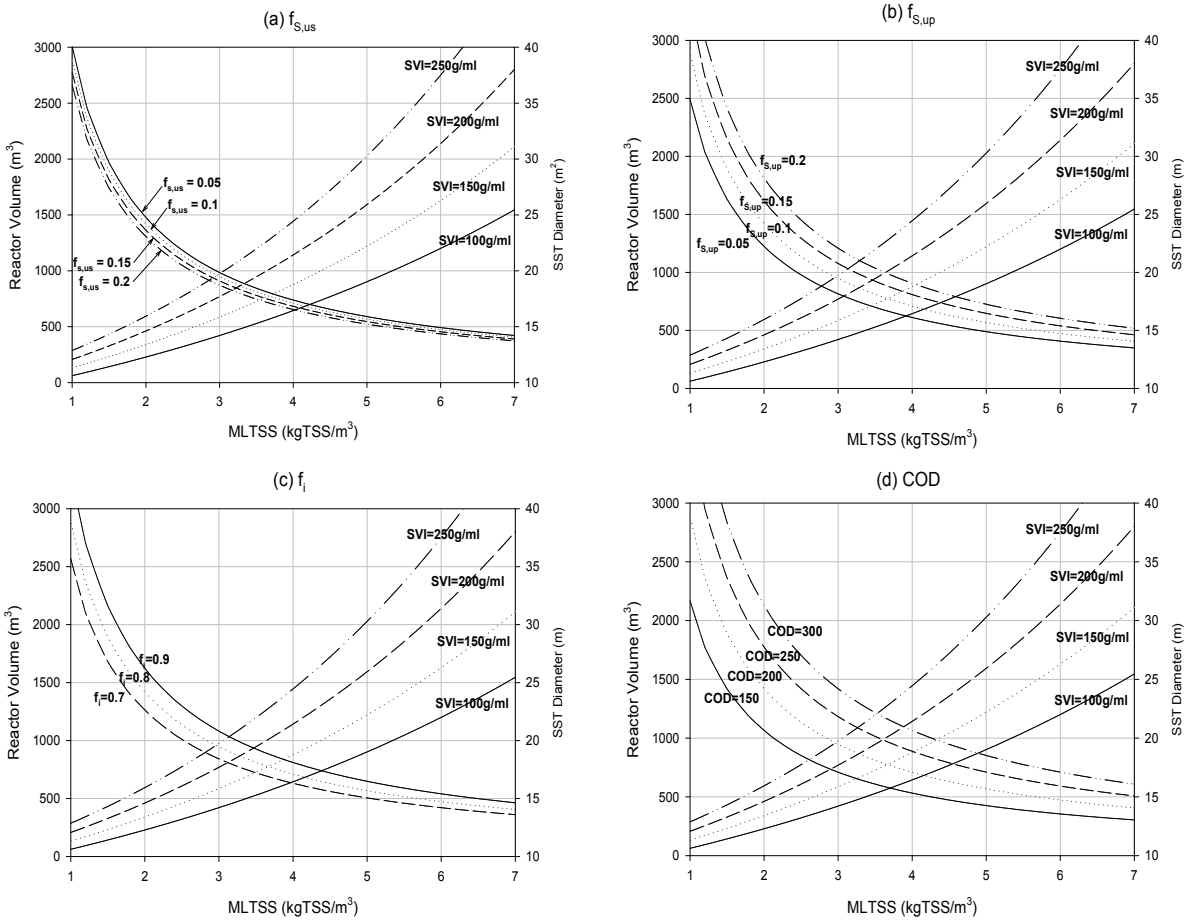

Fig. 2. The Effect of Influent Characteristics ($f_{S,us}$, $f_{S,up}$, f_i and COD) and Sludge Settling Characteristics (SVI) on Both Reactor Volume and SST Diameter

및 2차 침전조 크기에 미치는 영향을 살펴보면 다음과 같다. 먼저 Fig. 2(a)에서 유입수내 난분해성 용해성 물질분율($f_{S,us}$)의 값을 0.05, 0.1, 0.15 및 0.2로 변화시켜 슬러지 농도에 따른 반응조 부피를 계산하여 도식화하였다. 난분해성 용해성 물질의 경우 반응조 내에서 거의 반응을 거치지 않고 최종 유출되므로 슬러지 생산량에 큰 영향을 미치지 않게 된다. 그러므로 유입수의 분율($f_{S,us}$)이 변하더라도 반응조 크기 결정에 큰 영향을 미치지 않게 된다. Fig. 2(a)를 참조하면, $f_{S,us}$ 값이 변화하더라도 L-shape curve가 거의 변화가 없는 것으로 나타난다.

이에 반해 유입수의 난분해성 입자성 물질의 경우 생물학적 반응을 거의 거치지 않고, 또한 유출수와 함께 유출되지 않으므로, 반응조 슬러지 생산량에 직접적인 영향을 미치게 된다. 따라서 난분해성 입자성 물질($f_{S,up}$)이 커지면서 슬러지 생산량이 증가하게 되고 동일한 슬러지 농도를 산출하려면 슬러지의 희석이 필요하게 되어 반응조의 크기가 커지게 되는 것이다. Fig. 2(b)의 L-shape curve를 참조하면 슬러지 농도 3,000 mgTSS/ℓ에 대하여 반응조 부피가 $f_{S,up}$=0.05의 경우 820 m^3 그리고 $f_{S,up}$=0.2의 경우 1,210 m^3으로 계산되어 약 400 m^3의 차이가 발생함을 보여주고 있어 설계에서 중요하게 고려되어야 할 인자로 판단되었다.

MLVSS/MLTSS 비(f_i)의 경우 0.7, 0.8 및 0.9로 변화시키며 슬러지 농도에 따른 반응조 크기를 Fig. 2(c)에 도식화하였다. 그래프는 $f_{S,up}$의 경우와 유사한 결과를 보여주고 있다. 이는 무기 고형물 역시 반응조 내에 축적되면서 슬러지 생산량에 영향을 주기 때문이다. 즉 f_i가 감소할수록 반응조 내의 무기 고형물의 양이 커지므로 슬러지 생산량이 커지는 것이다. 특별히 f_i 값 적용에서 주의해야 할 내용은 BEPR (biological enhanced phosphorus removal) 공정에 존재하는 PAO (Phosphate Accumulating Organisms)의 경우 미생물내 인 축적으로 인해 슬러지의 무기물 함량이 커지게 되고 결국 f_i 값이 0.45 정도까지 낮아지게 된다는 점이다(Wentzel et al., 1992). 그러므로 BEPR 공정

에 대한 반응조 및 2차 침전지 크기 결정의 문제는 향후의 연구가 필요한 부분이다.

유입수의 성상 중 마지막으로 유기물 농도의 영향을 파악하기 위해 S_u를 150, 200, 250 및 300 mgCOD/ℓ로 변화시켰다. Fig. 2(d)를 참조하면, 유기물 농도가 커짐으로써 슬러지 생산량이 커져, 반응조 내에 동일한 슬러지 농도를 산출하려면 잉여의 슬러지 생산량을 희석하여야 하므로 반응조의 크기가 커져야 한다.

또한 Fig. 2에서는 슬러지 침강성이 2차 침전지의 크기에 미치는 영향을 평가하기 위하여 SVI를 100, 150, 200 및 250 mℓ/g으로 변화시키며 계산을 수행하였다. Fig. 2의 J-shaped curve에서 나타나듯 SVI가 커지면서 2차 침전조에 수리학적 부하가 커지게 되어 동일한 슬러지 농도에 대하여 원활한 고액 분리를 유지하기 위해서는 2차 침전지가 커져야 한다. 슬러지 농도가 3,000 mgTSS/ℓ일때 SVI 값이 100 그리고 250 mℓ/g에 대한 2차 침전지 직경의 차이가 5 m 이상이 나타날 뿐 아니라 슬러지 농도가 커질수록 2차 침전지 크기에 미치는 SVI의 영향이 비례적으로 커지므로 SVI 값은 신중하게 고려하여 결정해야 할 인자이다.

3.2 슬러지 일령, 온도 및 첨두유량에 의한 영향

먼저 Fig. 3(a)에서 슬러지 농도에 대해서 SRT가 반응조의 크기에 미치는 영향을 도식화하였다. SRT가 증가함에 따라 동일한 슬러지 농도에 대한 반응조의 크기가 커짐을 보여주고 있다. SRT의 증가와 함께 슬러지의 자산화가 이루어지지만, 내생호흡미생물 그리고 유입수의 난분해성 입자성 물질이 반응조에 지속적으로 축적되므로 슬러지 생산량은 증가하게 된다. 결국 SRT 증가함에 따라 잉여 생산된 슬러지를 더 큰 반응조로 희석하여야만 동일한 슬러지 농도를 산출할 수 있게 되는 것이다. 온도 변화의 경우 설계에 큰 영향을 미치지 않음을 보여주고 있다. 그러나 본 연구에서 적용한 설계식에서 미생물의 내생호흡속도계수에만 적용되었으므로, 여타의 미생물 동역학 및 양론계수들에 대한 자세한 평가가 필요하다. 또한 온도 변화의 슬러지의 침강성에 대한 영향을 보고한 경우(Wilson, 1996)가 있으므로 향후 연구가 필요한 부분이다. 또한 Fig. 3에서는 평균유량에 대한 첨두유량비(PWWF/ADWF ratio; f_q)가 2차 침전지 크기에 미치는 영향을 보여주기 위해 f_q 값을 2, 3 및 4로 변화시키며 슬러지 농도에 대한 2차 침전지 크기를 평가하였다. Fig. 3에 나타나듯, f_q가 커질수록 2차 침전조에 일시적인 수리학적 부하가 커지므로 동일한 슬러지 농도에 대하여 고액분리를 유지하기 위해서는 2차 침전지가 커져야 한다. f_q의 경우 지역적 특성에 따라 차이가 있으나 KWWA (1998)에 따르면 안전 설계를 위해 3으로 규정하고 있다.

3.3 생물 반응조, 2차 침전조 다수인 대규모 처리장

Fig. 4에서는 Table 1에 나타나 있는 대표값을 입력하여 100,000 m^3/d 규모의 대규모 처리장의 슬러지 농도에 대한 반응조 및 2차 침전지의 개수를 도식화하였다. 대규모 처리장의 경우 개별 반응조 및 2차 침전지 크기 (Vreactor=3,000 m^3, ASST=707 m^2, ΦSST=30 m)를 설정하였다. 정상상태 설계식 및 1-D flux theory 설계식으로 계산된 반응조 및 2차 침전지 전체 크기를 개별 반응조 및 침전지 크기로 나누어 개수를 산정하게 된다. 여러 가지

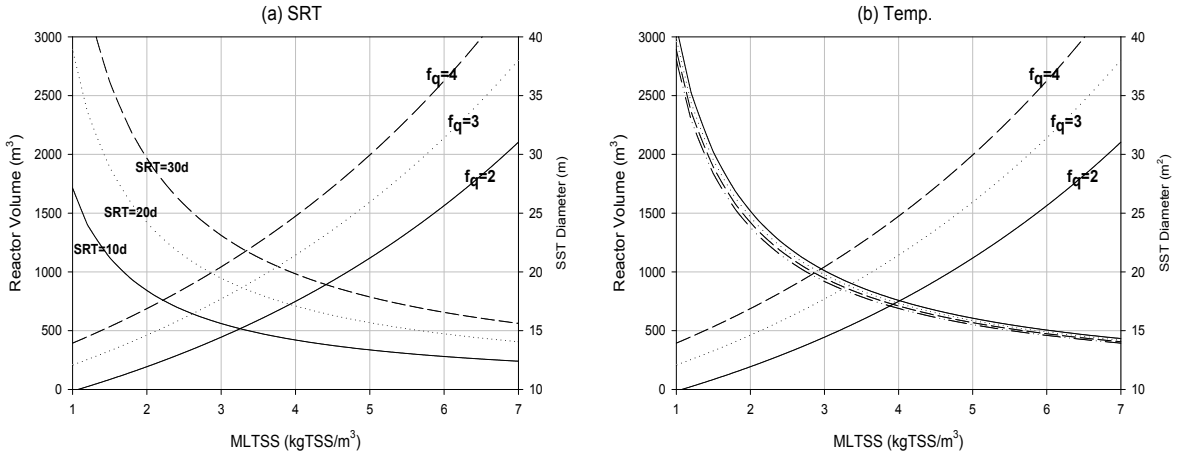

Fig. 3. The Effect of Operational Condition (SRT), Environmental Condition (temperature) and Flow Pattern (f_q: PWWF/ADWF ratio) on Both Reactor Volume and SST Diameter

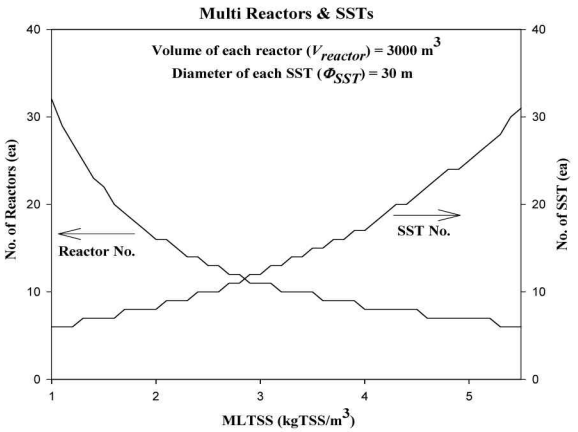

Fig. 4. Reactor Volume, SST Diameter and Numbers of Reactors and SSTs in Multi-reactor System

슬러지 농도에 대해서 현장공사 여건 등을 고려하여 반응조, 2차 침전지 및 전체 건설비용을 평가하면 최종적으로 최소 공사비용 지점이 산출된다. Fig. 4에서 슬러지 농도가 3,000 mgTSS/ℓ 지점을 보면 따라서 1개지 반응조의 부피 3,000 m^3 및 2차 침전조 면적 707 m^2(직경: 30 m)에 대하여, 전체 처리장은 11개의 반응조와 12개의 2차 침전지로 구성된다. 이는 반응조의 총 부피 31,537 m^3, 2차 침전조의 총 면적 8,195 m^{2}와 동일한 용량을 가진다. 계산된 설계용량에 대하여, 최종적으로 엔지니어는 건설비용을 산출하게 되고, 최소 공사비 지점에서 최적의 슬러지 농도를 결정한다.

4. 결 론

본 연구에서 슬러지 농도에 따른 생물학적 반응조 및 2차 침전지 크기 변화를 도식화하고, 유입수 성상이나 슬러지 침강성, 환경 및 운전조건 그리고 첨두유량이 단위공정의 크기결정에 미치는 영향을 평가하였다. 최종적으로 활성슬러지 공정의 반응조 및 2차 침전지의 일괄적 설계방안을 제시하였다. 도출된 결론은 다음과 같다.

1) 먼저 유입수의 특성과 관련하여 난분해성 용해성 물질($f_{S,us}$)은 반응조에서 거의 반응을 거치지 않고 유출되므로 반응조 크기 결정에 큰 영향을 미치지 않지만, 난분해성 입자성 물질($f_{S,up}$), 무기 고형물 및 유기물 강도(S_{ti})는 직접적으로 혹은 생물학적 반응을 거쳐 생성된 미생물로써 반응조에 축적되므로 슬러지 생산량이 증가하게 되고 결국 동일 슬러지 농도를 유지하기 위해서는 반응조 크기가 커지게 된다. 새로운 설계식은 이와 같은 유입수와 설계인자의 상관관계를 명확히 고려하고 있다.
2) SRT의 경우, 값이 증가함에 따라 슬러지 내생호흡으로 인하여 미생물이 사멸하지만 내생호흡미생물 및 유입수내 난분해성 입자성물질이 지속적으로 축적되므로 전체적인 슬러지 생산량이 증가하게 되므로 반응조 내 슬러지 농도를 일정하게 유지하기 위해서는 반응조가 커져야 한다. 따라서 SRT와 같은 운영인자 역시 설계식에서 명확히 반영되고 있다.
3) 슬러지 침전특성과 관련해서는, SVI 및 평균유량에 대한 첨두유량비(f_q)가 커질수록 2차 침전지에 수리학적 부하가 커지게 되므로 동일한 슬러지 농도에 대하여 고액 분리를 유지하기 위해서는 2차 침전지가 커져야 한다. 슬러지 침전특성은 가장 중요한 설계인자 중의 하나로 설계식에서 명확히 반영되고 있다.
4) 온도 변화의 경우 설계에 미치는 영향이 작았다. 그러나 미생물 동역학 및 양론계수들에 대한 자세한 평가가 필요하고, 슬러지의 침강성에 대한 온도 영향을 보고한 바가 있으므로 향후 연구가 필요하다.
5) 대규모 처리장의 경우, 전체 반응조 및 침전지 용량을 미리 설정된 개별 용량에 나누어 필요한 개수를 결정하였다. 엔지니어는, 본 논문에서 제시된 설계식을 사용하게 되면, 여러 가지 슬러지 농도에 대하여 반응조 및 2차 침전조의 크기, 개수 및 현장조건을 고려한 최소비용 설계와 함께 최적의 슬러지 농도를 결정하게 된다.

요약하면, 본 연구에서 개발된 활성슬러지 공정 설계방법론은 생물 반응조와 2차 침전지 간의 상호 연관성을 고려할 수 있을 뿐 아니라, 다양한 운영 및 설계인자의 영향을 반영할 수 있다. 단순히 설계 기준치 및 기준범위를 제공하는 경험적 방법에 반하여, 본 활성슬러지 공정 설계법은 공학적 원리에 기반하며 다양한 조건들은 반영하는 설계·운영 방법론이라 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2012학년도 경북대학교 학술연구비에 의하여 연구되었음.

References

Choi, E.S. (2001). *Water and wastewater treatment engineering*. CheongMoon-Gak, Korea.

Daewoo. (1998). *Biological Nitrogen and Phosphate*

Removal Process: DNR Process Design Manual. Daewoo Institute of Construction Technology, Korea.

Dold, P.L., Ekama, G.A., and Marais, GvR. (1980). "A general model for the activated sludge process." *Prog. Water Technol.*, Vol. 12, No. 6, pp. 47-77

Ekama, G.A., Dold, P.L., and Marais, GvR. (1986). "Procedures for determining influent COD fractions and the maximum specific growth rate of heterotrophs in activated sludge systems." *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 18, pp. 91-114

Ekama, G.A., Barnard, J.L., Ghnthert, F.W., Krebs, P., McCorquodale, J.A., Parker, D.S., and Wahlberg, E.J. (1997). *Secondary settling tanks: Theory, design, modelling and operation.* IAWQ STR No 6, International Association on Water Quality, London, UK.

Ha, J.S. (2002). *Performance evaluation of a BNR process with seasonal variation.* PhD Dissertation, Korea University, Seoul, Korea.

Henze, M., van Loosdrecht, M., Ekama, G.A., and Brdjanovic, D. (2008). *Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design*. IWA Publishing, London, UK.

Jenkins, D., Richard, M.G., and Daigger, G.T. (1984). *Manual on the causes and control of activated sludge bulking and foaming*. Water Research Commission, PO Box 824 Pretoria 0001, South Africa.

KWWA (1998). *Guidelines of sewage design*. Ministry of Environment, Korea.

Metcalf and Eddy. (1991). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. Mcgraw Hill, NY, USA.

Park, J.B. (2002). *The effects of DPAO and microbial community in the step feed 5-stage BNR process.* PhD Dissertation, Korea University, Seoul, Korea.

Randall, C.W., Barnard, J.L., and Stensel, H.D. (1992). *Design and Retrofit of Wastewater Treatment Plants for Biological Nutrient Removal.* Technomic Publishing Company, Lancaster, PA, USA

Wentzel, M.C., Ekama, G.A., and Marais, GvR. (1992). "Processes and modelling of nitrification denitrification biological excess phosphorus removal systems." *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 25, No. 6, pp. 59-82.

Wentzel, M.C., Mbewe, A., and Ekama, G.A. (1995). "Batch test for measurement of readily biodegradable COD and active organism concentrations in municipal wastewaters." *Wat. SA.*, Vol. 21, No. 2, pp. 117-124

Wilson, T.E. (1996). "A new approach to interpreting settling data." *Procs. 69the Annual WEF Conference and Exposition, Dallas*, Vol. 1, pp. 491-497

WRC. (1984). *Theory, design and operation of nutrient removal activated sludge processes.* Water Research Commission, PO Box 824, Pretoria 0001, South Africa.

논문번호: 14-005	접수: 2014.01.06
수정일자: 2014.03.10/03.26/04.24	심사완료: 2014.04.24