ISSN (Print) 1225-7672
ISSN (Online) 2287-822X
Journal of Korean Society of Water and Wastewater Vol. 28, No. 2, pp. 249-255, April, 2014
http://dx.doi.org/10.11001/jksww.2014.28.2.249

Improvement of effluent water quality by sludge aeration at the conventional drinking water treatment plant

정수장 슬러지 폭기를 통한 방류수 수질 개선

Ilgyung Choi · Changsoo Shin · Inho Beak · Jaecheol Lim · Chanwoo Jeong · Sungjin Lee* · Jungwook Park
최일경 · 신창수 · 백인호 · 임재철 · 정찬우 · 이성진* · 박정욱

한국수자원공사

Abstract : So many drinking water treatment plants are under various difficulties by new reinforced effluent standards. Since the target turbidity, much higher than annual average, for designing sludge thickener have to be set to confront high turbidity season, the sludge at thickener should be put up for a long time during usual days. So the soluble manganese and chloroform may be formed under the anaerobic environment in the sludge thickener when the sludge retention time is longer with low turbidity. This phenomenon results in difficulties to keep regulatory level of the discharged effluent. For an effort to overcome the problems, a sludge aeration was successfully implemented into the thickening process. As a result, the final effluent quality and sludge volume were much improved; 41 % of manganese, 62 % of chloroform and 35 % of sludge volume. Additionally, effluent quality was improved ; 61 % of Manganese on aeration with pH control and we could make sure of stability effluent quality despite a long sludge retention time. We recommended the standard of installation sludge aeration equipment to nationally supply water treatment plant under effluent water quality problem ; Manganese, Chloroform, etc.

Key words : Aeration, Sludge, Manganese, Chloroform, Sludge volume, pH control
주제어 : 폭기, 슬러지, 망간, 클로로포름, 슬러지부피, pH조정

1. 서 론

먹는물을 생산, 공급하는 정수장의 배출수처리시설은「수질 및 수생태계 보전에 관한 법률」을 근거로 1996년부터 폐수배출시설로 분류되어, 최종 방류수는 폐수종말처리시설 방류수 수질기준 및 배출 허용기준 이내로 배출되어야 한다. 정수장 배출수처리시설은 원수 탁도를 기준으로 연중 95 %이상 탁도 또는 평균 탁도의 4배값 중 큰 값을 기준으로 설계하고 있으나, 년중 2 ~ 3 NTU의 저탁도인 호소수를 원수로 사용하는 정수장에서는 배출수처리시설의 각종 공정에서 슬러지가 장기 체류하는 경우가 많다. 이로 인해, 하절기에는 정체된 슬러지에서 망간 용출 및 클로로포름 등 휘발성 유기물질의 생성으로 방류수 중 수질오염물질의 농도가 상승하는 것으로 나타났다. 2013년부터 중금속물질은 물론 특정수질유해물질의 배출에 대한 규제가 강화되고 있으며, 특히, 청정지역에 위치한 정수장의 배출허용기준은 망간 2.0 mg/L, 클로로포름 0.08 mg/L로 매우 엄격하게 설정되어 통상적인 조정→농축→탈수의 방법으로는 수질기준을 준수하기가 어려운 실정이다. 따라서, 기존 배출수처리시설 설계시 고려

• Received 27 December 2013, revised 16 March 2014, accepted 18 March 2014.
* Corresponding author: Tel : 054-370-7227 Fax : 054-370-7230 E-mail : lsjplay@kwater.or.kr

되지 않았던 망간과 클로로포름의 제거를 위해서는 산화-망간사 여과, 폭기 등 오염물질별 다양한 처리공정이 설치되어야 하나, 배출수처리공정에 위와 같은 처리시설의 도입은 현실적으로 불가능하다.

이에 방류수 수질에서 주로 문제시 되고 있는 망간, 클로로포름 등의 효율적인 처리방법을 제시하고자 국내 최초로 정수장 슬러지에 폭기를 실시하여 오염물질별 제거효과를 조사하였다. 정수장에서 기존의 슬러지 처리공정은 침전원리를 이용한 조정→농축 공정이다. 그러나, 본 연구에서는 배슬러지지에서 폭기를 시행하여 슬러지 혐기화를 차단하고, 특정수질유해물질을 휘발시켜 제거 한 다음 농축과정으로 이송하는 국내 최초의 신기술을 배출수처리공정에 적용하였다. 그 결과, 망간, 클로로포름의 제거율이 40 ~ 60 % 이상으로 방류수 수질기준 준수에 매우 효과적이며, 슬러지 농축성도 향상되었으며, 슬러지 농축시 망간의 재용출을 막기 위하여 폭기시 pH를 8로 조정한 결과, 망간 제거 효과가 상승하였으며 장기 체류시에도 방류수 수질 안정성 확보가 가능하였다. 추가적으로 본 슬러지 폭기 공정도입의 정수장 확산 보급을 위하여 원수 수질 및 슬러지 성상을 고려한 시설용량, 배슬러지지 용량별 표준 설치 안을 제시하였다.

2. 조사내용 및 방법

2-1. 조사대상

본 연구는 경북 청도군에 위치한 U정수장에서 발생한 침전슬러지를 대상으로 조사를 실시하였다. 정수장 슬러지는 원수의 수질, 응집제 종류, 투입량 등에 따라 많은 차이가 있으며, 연구대상인 U 정수장의 원수 수질 및 정수장 운영상태를 Table. 1, 2에 나타내었다.

정수장 슬러지의 적정 폭기조건을 산정하기 위하여 시험실에서 폭기량, 폭기시간 등 조건별로 시험하여 농축 후 슬러지 부피(Sludge Volume), 상징수 망간 농도를 조사하였다. 이를 토대로 정수장 배출수처리시설에서 폭기 후 슬러지 부피(SV), TOC, TS, VS, FS 및 분자량별 유기물 분포(Organic Carbon Detector, OCD) 변화를 조사하였고, 상징수에 대해 망간, 클로로포름, 1,1-디클로로메탄을 조사하여 폭기효과를 분석하였다.

또한 하절기 및 슬러지 장기체류시 망간의 제거율을 높이고 수질안정성을 높이기 위하여 폭기시 pH 조정 효과를 분석하였다.

2-2. 배출수처리시설 폭기효과 조사

U정수장은 배슬러지지(조정조)가 설치되어 있지 않아, 농축조 2지 중 1지에 송풍기 및 산기판을 Fig. 1와같이 설치하여 폭기조로 활용하였으며, 폭기시간별(비폭기, 2, 6, 12, 24시간)

Table 1. Raw water quality of U water treatment plant (Jan. 2011 ~ Nov. 2013)

Section	Turbidity(NTU)	Alkalinity(mg/L)	TOC(mg/L)	COD(mg/L)	Chl-a($\mu g/m^3$)	Mn(mg/L)
Ave.	3.5	16	1.9	2.1	2.8	0.12
Max.	29.0	24	3.4	3.4	28.6	0.97
Min.	0.5	13	-	1.5	0.8	-

Table 2. Operation condition of U water treatment plant (Apr. ~ Nov. 2013)

Section	coagulant	Alkalinity	disinfectant
type	PACS-2	$Ca(OH)_2$	Cl_2 gas
dosage	13 ~ 20 ppm	2 ~3 mg/L	2 ~ 5 mg/L

ISSN (Print) 1225-7672
ISSN (Online) 2287-822X
Journal of Korean Society of Water and Wastewater Vol. 28, No. 2, pp. 249-255, April, 2014

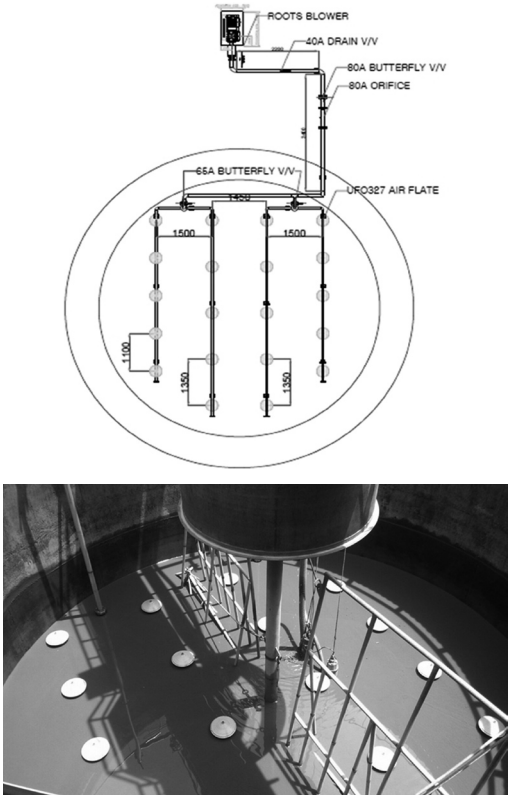

Fig. 1. Aerator designs and view of aerator installation.

Table 3. Specification and design condition on aeration equipment

Section	Contents
Aeration tank volume(m^3)	155
Input sludge quantity(m^3/d)	120
BOD_{IN}(mg/L)	150
BOD_{OUT}(mg/L)	60
SS(mg/L)	5,000
MLVSS(kg)	180
MLVSS/SS ratio	0.3
O_2 demand removal BOD(kg O_2/kg BOD)	0.7
O_2/VSS ratio for endogenous respiration VSS	0.15

로 슬러지를 현장에서 채수하여 농축시간별 침강성(SV)을 측정하였다. 또한, 각 시료별 24시간 농축 후 슬러지에 대해 TOC, TS, VS, FS, OCD(Organic Carbon detector)를 측정하였고, 상징수의 망간, 클로로포름, 1,1-디클로로메탄을 측정하였다.(현장 기온 33 ℃)

폭기량 산출은 폭기 후, 슬러지의 DO를 4 mg/L 이상을 목표로 하였으며, Table 3과 같이 폭기조 설계조건 및 시험실 기초조사 결과를 고려하여 폭기량을 2 m^3/min로 산정하였다.

2-3. pH 조정을 통한 망간 제거효율 조사

U정수장 폐수배출시설의 배출허용기준은 망간 2.0 mg/L(청정지역)으로 매우 엄격하게 설정되어 있어 하절기에는 기준초과 우려가 있다. 폭기에 의한 망간의 산화반응은 아래의 반응에 따라 이루어진다. 산소에 의한 망간의 산화속도는 pH에 영향을 받으며, pH가 낮으면 환원상태가 되므로 통상 pH 9.5 이상 유지시 반응속도가 높다.

$$Mn(Ⅱ) + O_2 \rightarrow MnO_2 \text{ (slow)}$$
$$Mn(Ⅱ) + MnO_2 \rightarrow Mn(Ⅱ) \cdot MnO_2 \text{ (fast)}$$
$$Mn(Ⅱ) \cdot MnO_2 + O_2 \rightarrow 2MnO_2 \text{ (very slow)}$$

망간 산화의 최적의 pH 조건 찾기 위하여 pH 7, 8, 9 로 조정 후 폭기(300 mL/min, 20 L 슬러지 대상, 12시간동안 폭기)하여, 농축 시 상등수의 망간 농도 및 슬러지 침강성을 조사하였다. pH 조정은 분말소석회(수처리제, CaO 99 %)를 사용하였으며 시료의 슬러지 함수율은 99.3 %이며 25 ℃ 시험실 조건에서 수행하였다.

3. 조사 결과

3-1. 배출수처리시설 효과분석 결과

배출수 처리시설에서 폭기조건 산정을 위해 기초시험을 실시한 시험결과를 Fig. 2에 나타내었다. 침전슬러지 20 L를 대상으로 공기량 0, 300, 600, 900 mL/min로 24시간 폭기한 결과 300 mL/min 유량에서 슬러지 침강성, 상징수 망간농도가 비폭기시보다 양호하게 나타났고 폭기량 증가시 큰 변화는 없었다. 또한 폭기량 300 mL/min 유량으로 0, 2, 6, 12, 24시간 폭기한 결과 12시간 이상 폭기시 개선 효과가 큰 것으로 나타났다.

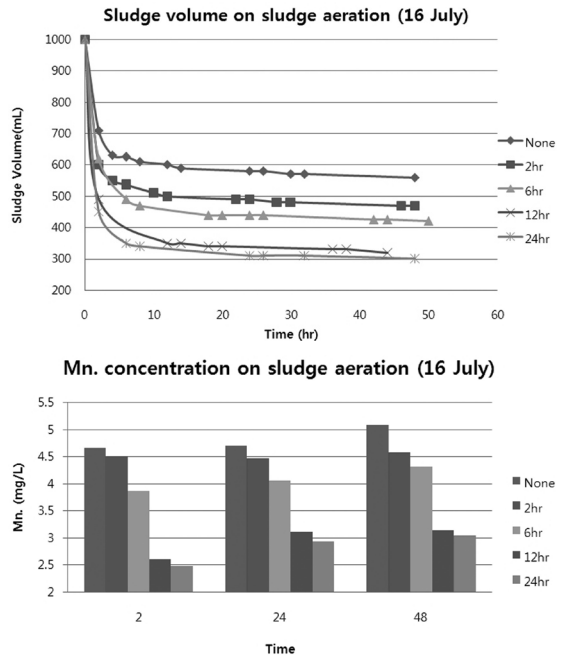

Fig. 2. Sludge volume and Mn concentration on sludge aeration(at 28 ℃).

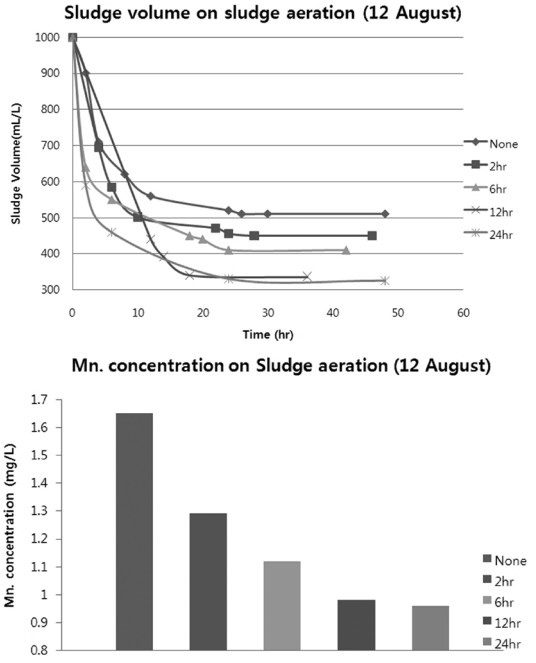

Fig. 3. Sludge volume and Mn concentration on sludge aeration (at 33 ℃).

배출수처리시설에서 폭기효과를 검증하기 위하여 폭기량은 2 m^3/min으로 실시하였으며, 폭기시간 0, 2, 6, 12, 24 hr 에 따른 슬러지 침강성, 상징수 망간농도 측정결과를 Fig. 3에 나타내었다. 12시간 폭기 후 24시간 농축하여 조사한 결과, 슬러지 침강부피와 상징수 망간농도는 비폭기시 520 mL/L, 1.65 mg/L에서 폭기 338 mL/L, 0.98 mg/L로 각각 35 %, 41 % 감소되었다.

클로로포름, 1,1-디클로로메탄, TOC, TS, VS, FS는 폭기 후 24시간 농축시켜 분석한 결과(Fig. 4), 클로로포름은 6시간 이상 폭기하면 효과가 큰 것으로 나타났으며, 12시간 동안 폭기하였을 경우, 비폭기시 0.175 mg/L에서 폭기시 0.067 mg/L로 62 % 저감되었었다. 또한 1,1-디클로로메탄은 전 시료에서 불검출로 비교가 불가하였고, TOC, TS, VS, FS 분석결과 폭기에 의한 유기물의 농도는 큰 변화가 없었다.

또한, 유기물 분자량 분포(OCD)에 대해 분석결과(Fig. 5) 폭기에 따른 분자량 분포는 큰 변화를 나타내지 않았다. 이론적으로 폭기에 의해 유기물이 산화됨에 따라 클로로포름 전구물질이 감소되어 클로로포름이 저감되고, 유기물질 감

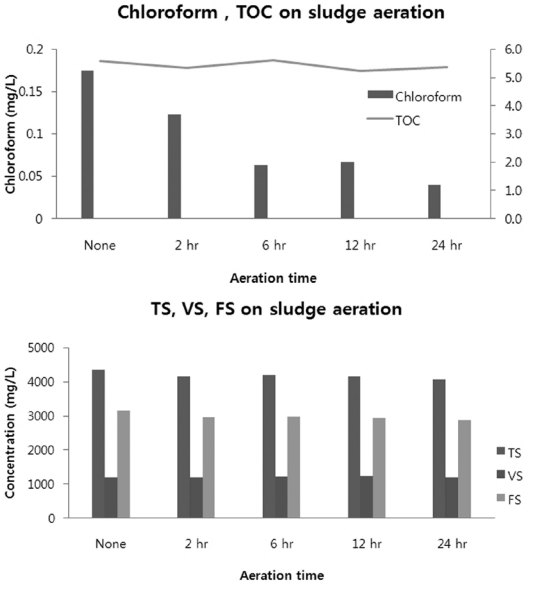

Fig. 4. Variation of feature sludge on aeration.

ISSN (Print) 1225-7672
ISSN (Online) 2287-822X
Journal of Korean Society of Water and Wastewater Vol. 28, No. 2, pp. 249-255, April, 2014

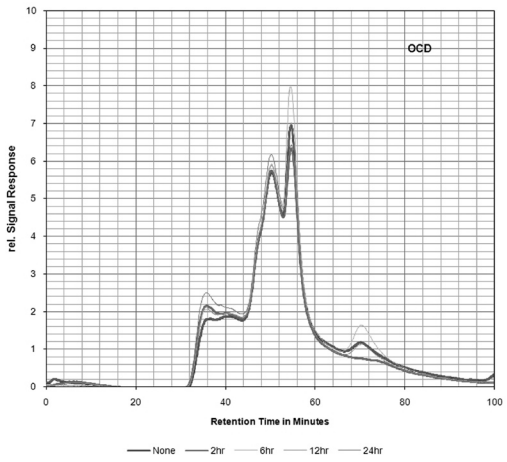

Fig. 5. Distribution of orgarnic carbon complex by molecular weight on aeration.

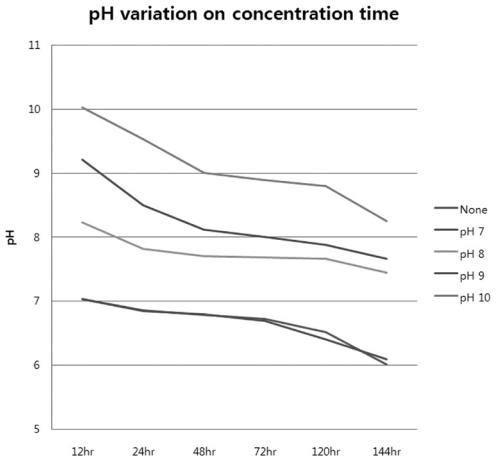

Fig. 6. Variation of pH with concentrating time at different pH value.

소에 따라 슬러지의 침강성이 개선될 것으로 예측되나, 본 시험으로 폭기에 의한 분자량별 유기물의 분포는 큰 변화가 없는 것으로 조사되었으며, 메커니즘 규명을 위한 추가 보완조사가 필요하다.

3-2. 폭기 후 농축시 수질안정화 방안 조사결과

폭기에 의한 망간 처리법은 반응속도가 느리며, 9.5이상의 높은 pH 조건에서 효과가 있는 것으로 알려져 있으나, 현장 조사결과 제거율이 약 40 %로서 효과적인 것으로 조사되었다. 그러나 하절기 및 농축조내 슬러지 장기 체류시 망간농도가 재상승 되므로 방류수질의 안정성 확보를 위한 추가적인 방법이 필요하다. 배출수처리 공정에서 최적의 pH조건을 찾기 위한 조사결과는 Fig. 6, 7, 8에 나타내었다. pH 조정을 통한 폭기시험 후 슬러지는 체류시간이 증가할수록 pH는 점점 낮아지는 경향을 보였다. 이는 pH가 높은 상태에서는 알루미늄 음이온($Al(OH_4)^-$) 생성으로 수소이온이 생성된 결과로 사료된다.(S. Kawamura, 2003) 또한, pH가 높아질수록 슬러지 침강성도 소폭 개선되어 pH7인 825 mL/L에서, pH 8에서 810 mL/L로 2 % 감소 효과를 보였다. 상징수 망간농도는 pH 7 조건에서 초기

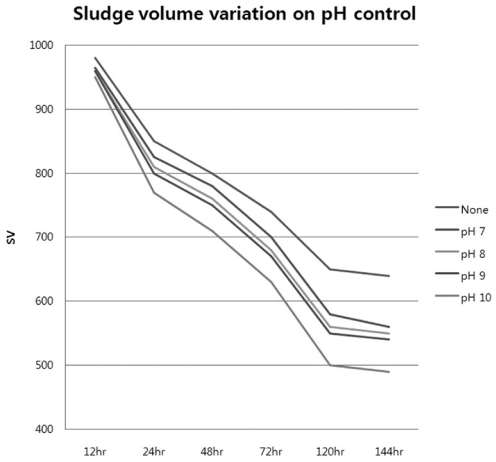

Fig. 7. Variation of Sludge volume with concentrating time at different pH value.

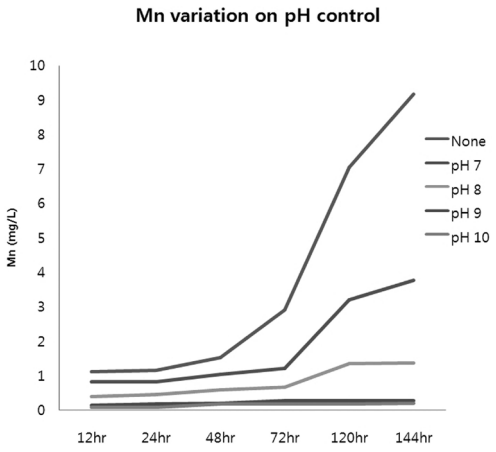

Fig. 8. Variation of Mn with concentrating time at different pH value.

0.82 mg/L에서 144시간 농축시 3.77 mg/L 까지 상승하였고, 24시간 농축기준 pH 7(원슬러지) 0.83 mg/L에서 pH8로 조정시 0.45 mg/L로 46 %의 추가 제거되었다.(비폭기에 비해 61 % 제거) 또한 농축조에서 슬러지가 144시간 장기 체류시 pH 8로 조정하였을 경우 상징수 망간이 1.37 mg/L로 수질 안정성이 확보되어 가장 엄격한 청정지역의 배출허용기준인 2 mg/L을 준수할 수 있는 것으로 나타났다.

3-3. 폭기 설비 도입을 위한 표준화 방안

정수장에서 발생되는 배출수의 수질관리를 위하여, 침전슬러지를 배슬러지지에서 폭기를 통해 망간, 휘발성 물질 등 오염물질 저감 및 균질화 후 농축조로 이송하여 탈수처리를 하는 것이 이상적인 공정으로 조사되었다. 슬러지 폭기 설비 용량은 계획슬러지량 즉, 정수장의 탁도, 응집제 주입율, 시설용량에 따라 결정된 배슬러지지 용량 및 슬러지 성상에 따라 결정되어야 한다. 슬러지 폭기효과가 검증된, 경북 U정수장에 설치된 설비 제원 및 대상 슬러지의 물리적 특성을 기준으로 설계인자를 산정하였다. 이 산정된 설계인자와 대상 정수장의 슬러지 성상(유기물, 망간, 클로로포름) 및 공정운영 조건(염소투입공정)에 따라 결정되는 보정계수와 여유율(1.2 ~ 3)을 고려하여 폭기설비 용량이 결정되어야 한다. 예를 들면 산화 또는 호기성 유지를 위해서는 원수내 TOC, Chl-a 및 Mn, 염소주입율, 슬러지내의 유기물 함량이 높을수록 폭기 용량이 커져야 할 것이다. 정수장 원수수질에 기인한 슬러지 조건(망간, 클로로포름, 유기물 등)에 대응하여 보다 정밀한 적용인자 도출이 필요한 경우엔 추가적인 연구가 필요하여 본 연구에서는 별도의 보정계수를 고려하지 않았다. 설계인자 산정을 위한 U 정수장 설치 내역 및 슬러지 성상을 Table 4, 5에 나타내었으며(정수장 원수 수질 및 공정운영현황은 Table 1, 2에 기 제시), 정수장 시설용량별 표준 설치 방안을 Table 6.에 제시하였다.

Table 5. Physical properties of settled sludge at U water treatment plant

Section	Contents	Remark
SiO_2(%)	18.3 ~ 18.7	dry solid
Al_2O_3(%)	34.5 ~ 35.0	dry solid
TS(mg/L)	4,000 ~ 6,000	
VS/TS(%)	27 ~ 40	
water contents(%)	99.2 ~ 99.5	

Table 4. Design factors of scale-specific facilities

Section	U water tratrment plant			Need air flux	Need distribution plate[1)]	Blowing time[2)]
	spec.	Air flux	Distribution plate(EA)			
Equalization tank area	44 m^2	2 m^3/min	20	0.045 $m^3/m^2 \cdot$ min	0.45 EA/m^2	Over 12 hour
Equalization tank volume	155 m^3			0.013 $m^3/m^3 \cdot$ min	0.13 EA/m^3	

1) Specification of distribution plate : 0.1 m^3/EA
2) Blowing time : general 12 hour, blowing-time is determined by sludge aeration test
3) Blower capacity : 1.83 kw/ m^3/min(air) at U water treatment plant.

Table 6. Standard installation according to facilities & equalization tank capacity

Facilities capacity	Equalization tank(ave.)[1)] Volume(m^3)	Air flux need[2)] (m^3/min)	Distribution plate need[2)](EA)
Less than 50 thousands m^3/day	329	5.2	52
Less than 100 thousands m^3/day	660	10.3	103
Less than 300 thousands m^3/day	2,422	37.8	378
Less than 1,000 thousands m^3/day	5,723	89.3	893

1) average tank volume of 24 K-water water treatment plants 2) safety factor : 1.2

ISSN (Print) 1225-7672
ISSN (Online) 2287-822X
Journal of Korean Society of Water and Wastewater Vol. 28, No. 2, pp. 249-255, April, 2014

4. 결 론

정수장에서 발생한 슬러지의 폭기에 따른 효과는 다음과 같다.

1) 실공정인 배출수처리시설에서 2 m^3/min으로 12시간 폭기 후 24시간 농축한 경우(Fig. 6), 상징수 망간농도는 비폭기에 비해 41 % 제거되었으며, 슬러지 침강부피는 35 % 감소되었다. 또한 클로로포름은(Fig. 7) 비폭기에 비해 62 % 감소되었다. 그러나, 유기물 농도(TOC, VS)는 폭기에 따른 큰 변화는 나타내지 않았으며, 분자량 크기별 조성분포(Fig. 8) 역시 뚜렷한 변화는 나타나지 않아, 폭기에 의한 유기물 변화 경향은 확인하지 못했다.
2) 폭기한 슬러지가 농축을 위해 장기간 체류시 상징수 망간농도는 초기 0.82 mg/L에서 144시간 이후 3.77 mg/L 까지 상승하였다. 방류수 망간 수질 안정성을 확보하기 위하여 pH를 조정한 결과, pH 8 조정 후 폭기시 비폭기에 비해 61 % 제거 되었다. 또한 농축조에서 pH 8로 조정하면 슬러지 장기체류시 망간의 재용출을 방지하고, 방류수 수질안정성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.
3) 슬러지 폭기 공정은 방류수의 망간 및 클로로포름을 간단하고 효과적으로 제거할 수 있는 이상적인 공정으로 조사되었다. 전 정수장 배출수처리시설에 슬러지 폭기공정 확대보급을 위해서 시설 규모별 설치 및 운영기준을 산출한 결과, 배슬러지지 용량(m^3)당 약 0.013 m^3/min 의 공기량이 필요하며, 0.13개의 산기판이 필요한 것으로 계산되었고, 폭기시간은 기초조사를 통하여 산정하는 것이 타당하며, 약 12시간동안 폭기하는것이 효율적인 것으로 사료된다. 또한 폭기를 위한 동력은 U정수장 설치 송풍기 고려, 1.83 kw/m^3/min(air)으로 나타났으며, 1일 12시간 가동기준 전력비는 1,757원/m^3/min으로 나타났다. 여기에 슬러지 성상에 따른 보정계수 및 여유율을 고려하여 폭기설비를 설치해야 할 것이며, 보정계수의 산정을 위해서는 추후 보완 연구가 필요하다.

본 연구 결과 슬러지 폭기를 통하여 상징수 중의 망간은 물론, 클로로포름 등 휘발성유기물질의 저감과 슬러지 침강성 개선에도 효과가 우수한 것으로 나타났으며, 2013년부터 방류수 규제가 강화된 망간과 클로로포름은 배슬러지지에서 슬러지 폭기공정 도입을 통하여 획기적인 개선이 가능하다. 추가적으로 pH 8이상으로 조정 후 폭기하면, 슬러지 장기체류로 인한 망간 재용출 문제도 해결할 수 있다.

참고문헌

S.Kawamura(2003), Intergrated design of water treatment facilities, pp 86-87, 411-413, 563-564

Vesilind, P.A(1979), *Treatment Disposal of Waste-water Sludge*, revised Ed. Ann Arbor Science, Michigan.

Yu, Myung(1991), Effect on settling characteristics to sludge physical properties, KSCE. *Journal*. pp. 765-768

Youn, Choi(2011), Behavior characteristics of Manganese at the stream, KSWE · *KWWA*, *Journal A-17*

Jung (2001), Sesonal varition of settling characteristics of water treatment sludge and the application of zone settling velocity models, *Jonals of KWWA Vol. 15- 6*, pp. 523-531

Choi (2010), The study of Manganese removal mechanism in aeration-sand filtration process for treation bank filtration water, Jounal of KWWA Vol. 24-3, pp. 341-349

KWWA(2010), Standard of Water supply, p.675

K-water(2011), The guidelines for improving quality df discharge water at WTP., pp. 3-8.

K-water(2012), Report of Best practics Maganese removal at water treatment process, pp.1-4