

강우로 인한 유입하수량 증가와 슬러지 계면높이 변화에 따른 하수처리장 효율평가 Evaluation of Sewage Treatment Plant Efficiency in the Variation of Sewage Inflow and Sludge Interface Height by Rainfall

박혜숙* · 송석헌†

Hye-Sook Park* · Seok Heon Song †

*대전보건대학교 환경보건과 · 대전광역시 시설관리공단

*Daejeon Health Science College, Department of Health Environment

Daejeon Metropolitan City Facilities Management Corporation

(2014년 7월 1일 접수, 2014년 8월 20일 수정, 2014년 8월 29일 채택)

Abstract : Variation of sewage sludge interface height and flow rate by rainfall were applied to the actual public sewage treatment plant, and the efficiency of sewage treatment was evaluated by measuring BOD₅, COD_{Mn}, SS, T-N, and T-P. When both flow and interfacial height are increased, the treatment efficiencies in terms of the five water pollutants are decreased. Among them SS is the most critical pollutant in rainfall. When 0.5 Q inflow was applied, the efficiencies were 74.2% at the sludge interface height of 0.5 m, 76.4% at 1.0 m, 70.2% at 1.5 m, and 60.7% at 2.0 m. When 1.0 Q inflow was applied, the efficiencies were 71.7% at the sludge interface height of 0.5 m, 71.9% at 1.0 m, 46.4% at 1.5 m, and -38.0% at 2.0 m. Operation at 2.0 Q~2.0 m and 3.0 Q~1.0 m above the sludge rising phenomenon occurred causing adverse effects on the public bodies. If the flow rate increases, the processing efficiency is reduced from 74.2% to 17.3%, even though the sludge interface height was maintained at 0.5 m, so that the inflow adjustment was most important during rainfall, and the interface height of 1.0 m should be maintained to minimize the adverse effect on public water system.

Key Words : Rainfall, Public Water System, Sewage Sludge Interface Height, Primary Treatment Plant

요약 : 이상 강우 시 하수유입량과 슬러지 계면높이의 변화가 처리효율에 미치는 영향을 실제 처리장에 적용해서 실험한 결과, 유입량이 증가하고, 계면높이가 높아질수록 공공처리장 방류수 수질기준 항목인 BOD₅, COD_{Mn}, SS, T-N, T-P 처리효율이 감소하였다. 그중 SS는 강우 시 농도변화가 가장 심한 항목으로 0.5배(0.5 Q) 유입 시 슬러지 계면높이 0.5 m에서 74.2%, 1.0 m에서 76.4%, 1.5 m 70.2%, 2.0 m에서 60.7%로 계면높이를 1.0 m로 유지했을 때 처리효율이 가장 높았고, 1.0 Q 유입 시 0.5 m 71.7%, 1.0 m 71.9%, 1.5 m 46.4%, 2.0 m -38.0%로 나타났으며, 2.0 Q~2.0 m 이상과 3.0 Q~1.0 m 이상에서는 sludge rising 현상이 유발되어 공공수역에 악영향을 끼칠 수 있음을 알 수 있었다. 또한 계면높이를 0.5 m로 유지한다 할지라도 유입량이 증가하면 처리효율은 74.2%에서 17.3%로 감소하므로 강우 시 유입량 조절이 가장 중요하고, 계면높이를 1.0 m 이하로 유지하여 운영하여야 공공수역의 수질에 미치는 영향을 최소화 할 수 있다.

주제어 : 이상강우, 공공수역, 슬러지 계면높이, 1차침전지

1. 서론

공공하수처리장 운영에서 가장 중요한 것은 연중 안정된 방류수 수질을 유지하는 것이다. 하지만, 우리나라는 여름철의 집중호우와 이상기온에 따른 계류성 호우로 하수관거의 통수능력이 저하되고, 하수를 희석시켜 안정적인 수질 유지 및 관리에 큰 걸림돌이 되고 있다.¹⁾

국내 하수도 정비 기본계획 수립지침에서는 강우 시 설계 하수량의 3배(3.0 Q) 하수를 유입하여 전량 1차 처리한 후 2배(2.0 Q)는 by-pass하여 방류하고, 1배(1.0 Q)는 생물반응조로 유입시켜 처리하도록 하고 있는데, 일본 등 선진국에서는 강우 시 계획하수량(3 Q) 전량을 고급처리 하고 있다. 강우 시 처리되지 않고 방출되는 미 처리수는 수계의 수질을 악화시키고, 수중생태계를 파괴하는 주원인이 되고 있다.²⁾ 공공수역의 수질개선을 위해 가장 효율적이고 경제적인 방

법은 강우 시 초과유입수를 기존 하수처리 시설을 이용하여 1차 침전 후 by-pass되는 오염 부하를 저감시키는 기술이 가장 중요한데 우리나라는 이와 관련된 연구가 전무한 실정이다. 특히, 하수유입량이 증가함에 따라 1차침전지 슬러지 계면에 미치는 영향과 오염물질의 농도 변화 등 실제 현장에 적용해서 연구를 진행한 사례는 거의 없다. 김³⁾은 강우에 따른 유입유량 증가 시 하수처리시설의 최적운영 방안을 수치 모델을 이용하여 시뮬레이션 해서 최적관리 모델을 제시하였고, Rouleau⁴⁾는 900 m³의 소규모 하수처리장을 대상으로 1995년 7월부터 12월 사이에 내린 강우의 유량과 수질을 분석하여 하수처리장 관리방안을 제시하였다.

따라서, 본 연구에서는 D시에 소재해 있는 공공하수처리장 1차침전지를 활용하여 강우 시 하수유입량을 1 Q, 1.5 Q, 2 Q, 3 Q으로 변화시키고 1차침전지의 슬러지 계면높이를 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m, 2.0 m로 하여 유량증가에 따른 오염

† Corresponding author E-mail: ssheon0311@hanmail.net Tel: 042-610-2818 Fax: 042-610-2869

물질별 농도변화, 계면높이별 농도변화 및 그에 따른 처리 효율 등을 제시하여 강우 시 하수처리장의 효율적인 운영이 가능하도록 그 대안을 제안하고자 한다.

2. 실험방법

2.1. 대상처리장

본 연구수행을 위해 30만 m³/d 이상 전국 공공하수처리장 20개의 BOD₅, COD_{Mn}, SS, T-N, T-P를 조사하였고, 실제 처리장의 효율적용 평가를 위하여 선정한 D처리장은 금강 유역에 위치한 공공하수처리시설로 분류식 및 합류식 하수관거가 모두 존재하는 전형적인 도시 유입하수 특성을 갖고 있고, 방류수 수질기준 II지역이 적용되어 엄격히 관리되고 있는 처리장이다. 시설 및 운영현황은 Table 1과 같이 A₂O 계열의 고도처리 공법에 공침전을 위한 총인 처리시설로 운전되고 있다. 실험조사 및 분석은 2012년 3월부터 2013년 6월까지 수행하였다.

2.2. 실험내용 및 방법

D처리장의 수질파악을 위해 방류수 수질기준 항목인 BOD₅, COD_{Mn}, SS, T-N, T-P를 분석하고, 처리용량 30만 m³/d 이상인 전국 하수처리장의 평균농도와 비교하였다. 또한, 2012년 3월부터 8월까지 5회에 걸쳐 강우 시 유입하수 농도와 1차침전지 처리 후 농도를 분석하여 평상시 농도와 처리효율을 비교분석 하였으며, 유입하수량 변화와 1차침전지 슬러지 계면높이에 따른 처리효율 평가를 위해 Table 2와 같이 유입하수량을 0.5배(0.5 Q), 1배(1.0 Q), 2배(2.0 Q), 3배(3.0 Q)로 하여 체류시간과 표면부하율을 조절하고, 슬러지 계면 높이를 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m, 2.0 m로 한 후 1차침전지 유입수와 유출수의 농도를 분석하였다. 실험에 사용된 침전지는 중력식 원형침전지 Type의 1차침전지를 사용하였고, 수심은 3.0 m, 부피는 3,138 m³의 대규모 침전지로 규격과 운전조건은 Table 2와 같다.

수질분석은 Standard Method와 수질오염 공정시험기준에 준하여 분석하였고, 분석항목은 방류수 수질기준 항목인 BOD₅, COD_{Mn}, SS, T-N, T-P에 대해 실시하였다.^{8,9)}

Table 1. Typical conditions of wastewater treatment plant in study area

Capacity (m ³ /d)	Sewer system		Process	Phosphorus plant	Filtration plant	Disinfection plant
	Separated	Combined				
900,000	62%	38%	NPR, Bio-Sac A ₂ O	Co-precipitation	MDF	NaOCl

Table 3. Compare water by sewage treatment plant

Division	D-sewage concentration (mg/L)					The national average concentration (mg/L)				
	BOD	COD	SS	T-N	T-P	BOD	COD	SS	T-N	T-P
Influent	150.2	92.9	157.5	36.5	3.9	148.0	84.6	144.9	35.0	3.9
Effluent	2.5	11.2	3.0	12.2	0.2	4.3	9.9	3.2	10.9	0.7
Removal efficiency (%)	98.3	87.9	98.1	66.6	95.0	97.1	88.3	97.8	68.9	82.1

Table 2. Operating conditions

Division	0,5 Q	1,0 Q	2,0 Q	3,0 Q
Total volume (m ³)	3,138	3,138	3,138	3,138
Sewage flows (m ³ /h)	780	1,560	3,125	4,690
Retention time (h)	4	2	1	0,7
Surface loading (m ³ /m ² ·d)	18,2	36,3	72,6	108,9
Overflow loading (m ³ /m·d)	92,5	185	370	555
Sludge level (m)	0,5, 1,0, 1,5, and 2,0			

3. 결과 및 고찰

3.1. D하수처리장과 전국 하수처리장 수질비교

D하수처리장과 전국 하수처리장 수질을 비교 분석한 결과, D처리장은 COD_{Mn}, T-N을 제외한 BOD 98.3%, SS 98.1%, T-P 95.0%의 높은 처리효율을 보였다. 특히, D처리장의 T-P는 전국 평균 82.1%보다 약 13% 이상 높은 제거율을 보였는데, 이는 D처리장의 경우 타 지역보다 비교적 강화된 수질 기준(II지역, T-P 0.3 mg/L 이하)을 적용받으므로 다양한 시설투자 및 탁월한 처리기술로 관리를 철저히 하게 하기 때문인 것으로 판단된다.

3.2. D하수처리장 강우 시 처리효율

강우 시 유입수 평균 농도를 Table 3에 제시된 D하수처리장 년 평균 수질과 비교해본 결과, BOD₅ 77.0%, T-N 71.0%, T-P 69.0%로 평균수질 보다 낮게 유입되었으나 SS는 123.0%로 오히려 증가되었다. 이는 강우 시 전형적인 유입하수 농도 변화의 특성을 나타낸 것으로 Fig. 1에서 보는 바와 같이 강우 발생 후 초기강우 유출수 영향으로 BOD₅, SS, T-N, T-P 가 각각 385 mg/L, 436 mg/L, 46.0 mg/L, 5.9 mg/L로 급격히 악화되었는데 이는 이⁵⁾의 결과에서 도출한 강우 시 SS 475 mg/L와 비슷한 결과이며, 강우 종료 시점에는 각각 50 mg/L, 128 mg/L, 15 mg/L, 1.9 mg/L로 큰 폭으로 감소되어 전체 유입수질 농도는 평균유입 농도 보다 저하되는 것을 알 수 있었다. 또한, Table 4와 같이 2012년 3월부터 8월까지 강우 시 유입하수 농도를 분석한 결과, BOD₅ 149.0~101.4 mg/L, SS 256.5~152.9 mg/L, T-N 32.1~14.5 mg/L,

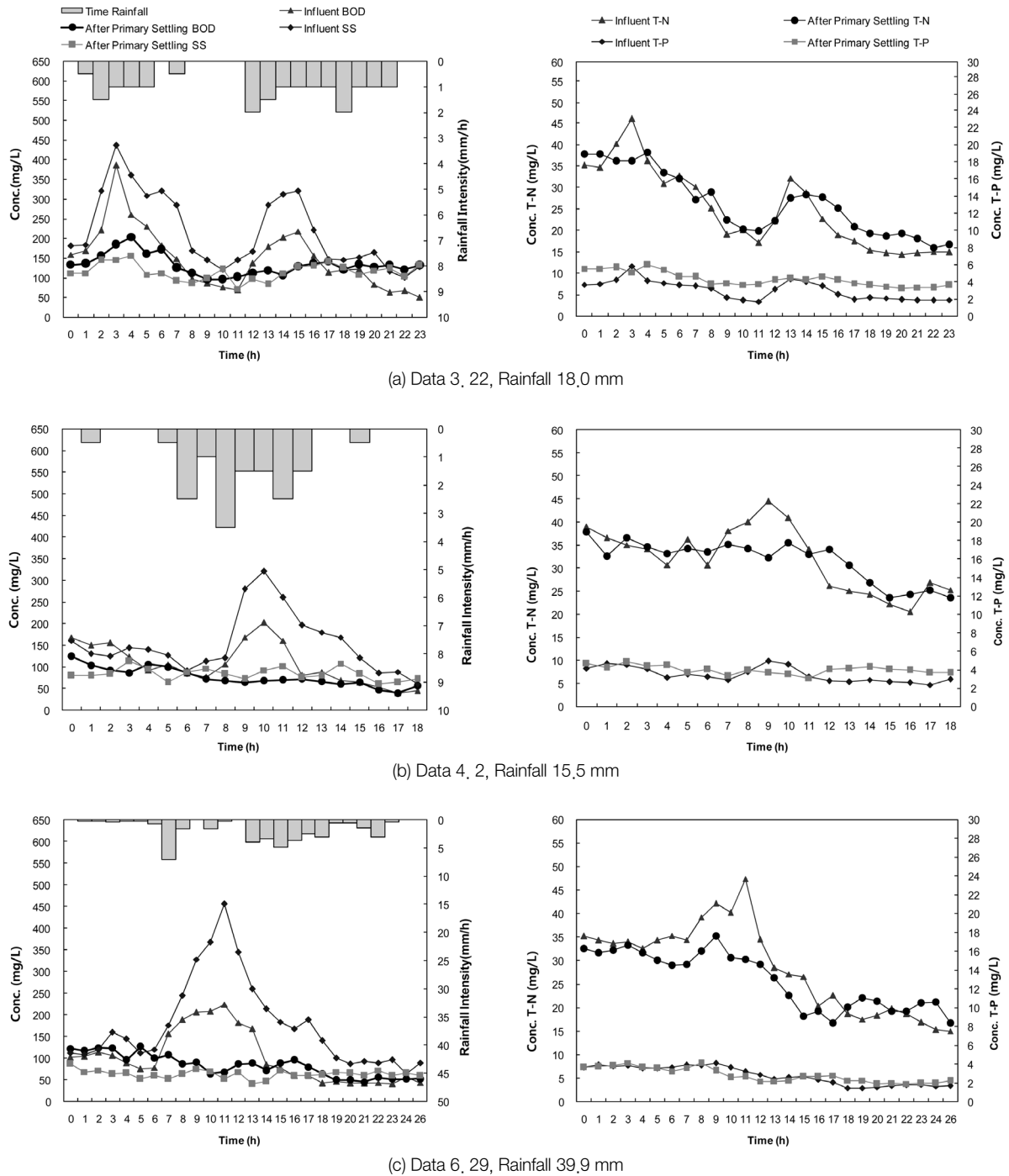


Fig. 1. Variation of influent and after primary wastewater quality during rainfall.

Table 4. Removal efficiency in primary treatment plant during rainfall

Date	Rainfall (mm)	Influent concentration (mg/L)				Primary treatment concentration (mg/L) (Removal efficiency (%))			
		BOD	SS	T-N	T-P	BOD	SS	T-N	T-P
3,22	18	149,0	217,6	24,9	3,0	132,4 (11,1)	115,0 (47,2)	26,3 (-5,6)	4,3 (-43,3)
4,2	15,5	106,7	152,9	32,1	3,4	76,0 (28,8)	83,9 (45,1)	31,6 (1,6)	4,0 (-17,6)
6,29	39,9	101,4	175,4	28,5	2,8	82,9 (18,2)	63,2 (64,0)	25,8 (9,5)	2,8 (0,0)
7,5	115,6	104,2	256,5	28,8	2,7	63,9 (38,7)	76,6 (70,1)	28,4 (1,4)	2,7 (0,0)
8,30	119,4	-	194,5	14,5	1,5	-	57,0 (70,7)	15,6 (17,6)	1,5 (0,0)
Average	58,88	115,3	199,4	25,8	2,7	88,8 (23,0)	79,1 (60,3)	25,5 (1,2)	3,1 (-14,8)

T-P 3.4~1.5 mg/L로 나타났다. 1차침전지 처리 후 평균 제거율은 BOD₅ 23.0%, SS 60.3%, T-N 1.2%로 강우 시 1차 처리 후 유출되는 하수에는 미처리된 유기물질과 부유물질 등이 함유되어 있어 공공수역의 수질을 악화시킬 수 있다는 사실을 확인할 수 있었다. 특히 T-P는 오히려 농도가 증가하였는데, T-P는 잉여슬러지 내 과잉 축적된 인 성분이 반류수로(농축여액, 탈수 여액, 등) 발생될 경우 인 재용출에 의해 고농도 T-P 반류 부하를 유발하고, 대부분 용존성 상태의 인 부하로 1차침전지에서 중력침전에 의한 제거에는 한계성이 있기 때문인 것으로 판단된다.

3.3. 유입하수량 증가와 슬러지계면 높이에 따른 처리 효율

강우 시 하수 유입량의 증가와 침전지 슬러지 계면의 변화가 방류수 수질에 미치는 영향을 파악하여 강우 시 처리장 운영에 대안을 제시하고자 Table 2에서 제시한 조건으로 실험을 수행한 결과는 Table 5와 같다. SS의 경우 0.5 Q 유입 시 슬러지 계면높이 0.5 m 74.2%, 1.0 m 76.4%, 1.5 m 70.2%, 2.0 m 60.7%로 계면높이를 1.0 m로 유지했을 때 처리효율이 가장 높았다. 또한 1.0 Q 유입 시 0.5 m 71.7%, 1.0 m 71.9%, 1.5 m 46.4%, 2.0 m -38.0%로 나타났다. 반면 유입수 2.0 Q일 때 계면높이 2.0 m 이상과 유입수 3.0 Q일 때 계면높이 1.0 m 이상에서는 공통적으로 sludge rising 현상이 유발되어 공공수역에 악영향을 끼칠 수 있음을 알 수 있었다. 또한 계면높이를 0.5 m로 유지하더라도 유입량

이 증가하면 처리효율은 74.2%에서 17.3%로 급격히 감소했다. 또한 BOD₅는 0.5 Q 유입 시 슬러지 계면높이 0.5 m 49.5%, 1.0 m 53.2%, 1.5 m 51.5%, 2.0 m 40.8%로 계면높이를 1.0 m로 유지했을 때 처리효율이 높았다. 2.0 Q~2.0 m에서는 sludge rising 현상이 나타났다. 그 외 COD_{Mn}, T-N, T-P도 역시 유입량이 증가하고, 계면높이가 높아질수록 처리효율이 감소했다. 이는 D 하수처리장에 설치된 원형침전지 내부 하수 흐름이 방사류 흐름(radial flow) 방식으로 중앙 정류통 내부로 유입됨에 따라 하류 수직류와 월류 웨어로 유출방향으로 단락류 흐름이 생성되는데, 하부에 슬러지 계면층이 높거나 또는 표면부하율이 기준 이상으로 클 경우 수직류와 단락류가 크게 증가되어 1차침전지 처리효율을 크게 저하시키는 것으로 판단된다. 그러므로 강우 시 유입량 조절이 가능하도록 시설보완이 필요하고, 계면높이를 활용하여 효율적인 운영이 요구된다.^{6,7)}

4. 결론

강우 시 유입하수량 증가와 1차침전지 계면높이의 변화가 D하수처리장의 처리효율에 미치는 영향을 실제 처리장에 적용 및 실험 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 강우 시 유입하수의 1차침전지 평균 제거효율의 감소에 의해 미처리된 잔류 유기물질과 부유물질의 농도 증가를

Table 5. Increased influx of sewage treatment efficiency according to the interface height

Item	Sewage flows (Q)	Influent concentration (mg/L)	Effluent concentration (mg/L) (removal efficiency (%))			
			Interface height 0,5 m	Interface height 1,0 m	Interface height 1,5 m	Interface height 2,0 m
SS	0,5	237,3	61,3 (74,2)	56,0 (76,4)	70,7 (70,2)	93,3 (60,7)
	1,0	256,0	72,5 (71,7)	72,0 (71,9)	137,3 (46,4)	353,3 (-38,0)
	2,0	246,0	93,3 (62,1)	282,7 (-14,9)	453,3 (-84,3)	Sludge rising
	3,0	220,0	182,0 (17,3)	Sludge rising	Sludge rising	Sludge rising
BOD ₅	0,5	288,7	145,7 (49,5)	135,2 (53,2)	140,1 (51,5)	171,0 (40,8)
	1,0	296,4	152,0 (48,7)	155,7 (47,5)	214,7 (27,6)	343,3 (-15,8)
	2,0	276,5	204,4 (26,1)	311,3 (-12,6)	372,7 (-34,8)	Sludge rising
	3,0	290,8	260,0 (10,6)	Sludge rising	Sludge rising	Sludge rising
COD _{Mn}	0,5	106,7	51,3 (51,9)	51,9 (51,4)	57,7 (45,9)	65,9 (38,2)
	1,0	102,5	52,2 (49,1)	58,0 (43,4)	84,0 (18,0)	121,5 (-18,5)
	2,0	120,0	88,4 (26,3)	160,7 (-33,9)	196,0 (-63,3)	Sludge rising
	3,0	98,2	83,3 (15,2)	Sludge rising	Sludge rising	Sludge rising
T-N	0,5	41,1	25,0 (39,1)	4,6 (33,3)	5,1 (26,1)	29,3 (28,7)
	1,0	44,6	28,5 (36,1)	5,2 (26,8)	5,6 (21,1)	49,7 (-11,4)
	2,0	46,2	31,1 (32,7)	7,7 (-10,0)	7,8 (-11,4)	Sludge rising
	3,0	42,5	36,7 (13,6)	Sludge rising	Sludge rising	Sludge rising
T-P	0,5	6,9	4,3 (37,7)	4,6 (33,3)	5,1 (26,1)	5,6 (18,8)
	1,0	7,1	4,6 (35,2)	5,2 (26,8)	5,6 (21,1)	8,2 (-15,5)
	2,0	7,0	5,2 (25,7)	7,7 (-10,0)	7,8 (-11,4)	Sludge rising
	3,0	6,8	6,2 (8,8)	Sludge rising	Sludge rising	Sludge rising

보였다. 특히 T-P는 오히려 농도가 증가하였는데, 이는 잉여슬러지 내 과잉 축적된 인 성분이 반류수로 발생될 경우 인 재용출에 의해 고농도 반류 부하를 유발하고, 대부분 용존성 상태의 인 부하로 1차침전지에서 중력침전에 의한 제거에는 한계성이 있기 때문인 것으로 사료된다.

2) 1차침전지 슬러지 계면이 1.5 m 이상인 경우 강우 시 2 Q 이상 하수 유입 시 슬러지 계면층 교란 현상이 발생되어 고농도 오염물질이 역전되어 유출되는 것으로 나타났으며 이는 하천으로 방류시 공공수역 수질을 크게 악화시킬 수 있고 1 Q 이하의 하수를 생물반응조로 유입 처리 시 생물반응조 충격 부하를 유발하여 처리장 공정 관리에 악영향을 줄 가능성이 있으므로 강우 전 1차침전지 슬러지 계면 높이는 1.0 m 이하 유지가 반드시 필요하다. 또한 본 연구 결과를 바탕으로 강우 시 하수처리장의 안정화와 공공수역 수질 개선 도모를 위해 효율적인 유입하수량 분배와 처리를 위한 적정 방안이 요구된다.

Acknowledgement

이 논문은 2012년도 대전보건대학교 교내연구비 지원에 의한 논문임.

KSEE

Reference

1. Shin, E.-B., Lee, D.-J., Kim, Y.-K., Kim, M.-K. and Hong, C.-E., "Evaluation of Interaction between Sewer and Treatment plant during Storm Event," Report on the Joint Conference of KSWW & KSWQ, Autumn, pp. 17~20(2002).
2. Ministry of Environment, "Report on the condition and improvement of wastewater treatment plant during rainfall," pp. 1~13(2012).
3. Kim, K.-R., "A Study on the development of sewage treatment plant optimal management model by inflow increase during rainfall," University of Seoul, Master thesis, pp. 3~6 (2008).
4. Rouleau, S. and Lessard, P., "Impact of storms flows on a small wastewater treatment plant : A case study, Urban wet weather pollution controlling sewer overflows and stormwater runoff," WEF, June 16-19, Quebec, pp. 15~78(1996).
5. Lee, D.-J., Shin, W.-B., Ahn, H.-W. and Kim, J.-H., "Alternatives for the stable operation of wastewater treatment plant in Combined Sewer System during wet weather," Report on the Joint Conference of KSWW & KSWQ, Spring, pp. 495~498(2004).
6. Ministry of Environment, "Report on the operating conditions of public wastewater treatment plants in Korea," pp. 36~42(2013).
7. Cho, K.-W., Song, K.-G., Kim, T.-G., Cho, Y.-M. and Ahn, K.-H., "A case study on the operational characteristics of wastewater treatment plant in combined sewer system during storm event," Report on the Joint Conference of KSWW & KSWQ, Autumn, pp. 957~960(2007).
8. APHA., "Standard Methods for the examination of water and waster," 20th ed. USA American Public Health Association, Washington, DC.(1998).
9. Choi, K.-C., Seong, I.-H., Kim, D.-W., Kim, Y.-H., Kim, T.-Y., Yoo, B.-R., Lee, S.-S., Lee, J.-Y., Lee, H.-S. and Jo, N.-Y., "Standard methods for the examination of water and wastewater," Donghwa Technology publishing(2012).