

처리수 재이용을 위한 최종침전지 유출수의 급속여과공정 처리특성

Treatment Characteristics of Rapid Filtration Process treating Secondary Clarifier Effluent for Wastewater Reuse

한 동 우*

Han, Dong Woo

Abstract

This research was focused upon experimental study for wastewater reuse and conducted to evaluate optimum operating conditions of rapid filtration process such as filter flow rate, filtration time and backwashing condition for reuse of secondary-treated effluent using the pilot plant installed in real wastewater treatment plant. Also, the experiment on treatment characteristics of coagulant-added activated sludge process was performed to compare with activated sludge succeeded to rapid filtration. As the filtration velocity was 100m/day, the filtration time of the rapid filter connected with activated sludge system was revealed to 40 hours. Backwashing of filter was conducted by water wash and air scour. The optimum backwashing time and backwash flow rate were 10min and 10LPM, respectively. The quantity of backwashing water of the rapid filter was about 2% of total treated water.

Key Words : wastewater reuse, filter flow rate, filtration time, backwash, coagulant.

요 지

하수 처리수의 재이용을 위하여 표준활성슬러지법에 의한 생물학적 처리 후 최종침전지 유출수를 급속여과공정으로 처리하기 위한 Pilot Plant 실험연구가 수행되었다. 또한, 활성슬러지와 연계된 급속여과공정과 포기조 후단에 응집제를 주입하는 활성슬러지 이후 급속여과 처리하는 공정과의 비교 실험도 행해졌다. 최종침전지 유출수를 급속여과공정으로 처리한 경우 여과속도는 100m/day, 여과지속시간은 40시간 이하로 운전하는 것이 타당한 것으로 나타났으며, 여과지의 역세척 주기는 여과속도 100m/day일 때 40시간에 1회 정도가 되었다. 여과지 역세척 시 역세척 방법은 공세 1분, 공세+수세 30초, 수세 1분, 공세+수세 2분, 수세 3분, 안정 30초, 배수 10분의 순으로 행하는 것이 효과적이었으며, 수세속도는 10LPM으로 전체 여과수량의 2% 정도였다. 표준활성슬러지 시스템에 의한 2차 처리수를 잡용수로 재이용 하기 위해서는 폭기조 후단에 응집제를 첨가하여 여과 공정을 후속공정으로 하는 시스템으로 유용하게 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 하수 재이용, 여과속도, 여과지속시간, 역세척, 응집제

* 밀양대학교 이공학부 토목공학과 겸임전임강사

Concurrent Full time Lecturer, Dept. of Civil Engrg., Miryang National Univ., Gyeongnam 627-702, Korea
(E mail : dwhj1228@hanmail.net)

1. 서론

지속적인 인구의 증가, 지표수 및 지하수의 오염, 수 자원의 불공정한 분배와 주기적이고 계절 편중적인 가뭄 등으로 수환경의 오염 및 수자원 부족현상은 날로 심각해지고 있다(Metcalf & Eddy, 1991). 우리나라의 경우 하천수는 강우의 계절적 편중현상으로 갈수기인 10월부터 4월까지 전 유역에서 물 부족현상이 일어나며 낙동강의 경우 유량변동이 매우 극심할 뿐만 아니라 강의 유지수량이 부족하게되고 많은 하폐수의 유입으로 수질오염은 더욱 가속화된다(김수원, 1994). 이 같은 용수부족문제에 대한 대책으로 용수댐의 건설, 갈수시 지표수개발이 곤란한 지역에 대체 용수원으로서의 지하수개발, 그리고 최근 들어 주목받고 있는 하수 처리수를 재이용하는 중수도의 보급 등이다. 최근 댐 건설에 따른 환경문제와 주민의 저항도 수자원 확보에 커다란 장애 요인으로 작용하고 있어 중수도 제도를 활용하면 물 수요량에 어느 정도 대처할 수 있는 방안이 될 것이다(建設部, 1994). 하수 2차 처리수 내에 포함된 SS농도의 감소뿐만 아니라 유기물, 질소 및 인 성분 가운데 부유성 물질에 함유된 부분이 제거되어 SS 이외의 수질항목에 대해서도 부유성이 차지하는 비율이 높은 경우 급속모래여과법은 유효한 제거방법으로 사용 가능 하다. 또한 부유성 물질의 제거로 인한 탁도 감소와 재생수의 미관 향상, 부유성 물질의 감소로 소독제나 자외선에 의한 살균효과의 증대 및 소독제 주입량과 자외선 조사량의 감소 등의 이점으로 인해 日本下水道協會(1994)는 하수고도처리 및 2차 처리수 재이용을 위한 중력식 하향류여과, 중력식 상향류여과, 그리고 상향류다층형여과 등에 관한 설계지침을 발표하였다. 본 연구에서는 실제 하수처리장에 Pilot Plant를 설치하여 하수 2차 처리수 재이용에 대한 조사를 목적으로 표준활성슬러지시스템에 급속모래여과공정을 연계하여, 급속여과공정의 최적운전조건 및 처리특성을 파악하기 위해 여과속도, 여층깊이 별 처리특성, 역세주기, 역세시간, 역세수량 등의 최적역세조건에 대한 조사 및 응집제를 폭기조 후단에 주입한 후 여과공정의 처리특성도 비교 연구하였다(한동우 등, 1995).

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 이용한 Pilot Plant의 실험장치는 Fig. 1

에 도시된 바와 같이 표준활성슬러지공법과 중력식 하향류의 급속모래여과공정을 연계하여 실험하였다.

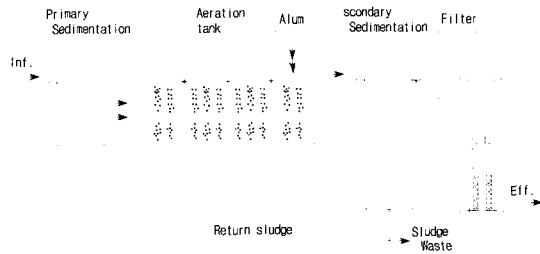


Fig. 1 Flow Diagram of Pilot Plant의 위치

Pilot Plant의 처리수량은 $2.5\text{m}^3/\text{day}$ 이었다. 최종침전지는 유효용량 208L, 두께 10mm, 직경 395mm, 높이 195cm의 투명아크릴의 원형침전지로 제작하였으며, 수리학적 체류시간은 2시간이고, 40cm간격으로 침전특성을 조사하기 위한 시료 채취구 및 조저부에 폐슬러지 배출밸브를 설치하였다. 포기조는 유효용량 830L, 가로 세로 80cm, 높이 130cm, 두께 10mm의 투명아크릴의 사각형조로서 포기시간 7.97시간, 반송슬러지와 하수원수의 혼합에 의한 체류시간은 7시간으로 설계되었다. 포기조저부에 다공성 미세산기관을 설치하고 air flowmeter로 포기조 내에 충분한 DO($2\sim 5\text{mg/L}$)가 유지될 수 있도록 하였다. 최종침전지는 원형침전지로서 유효용량 312.5L, 직경 395mm, 높이 280cm, 수리학적 체류시간 3시간, 최대 수면적부하 $22.64\text{m}^3/\text{m}^2/\text{day}$ 로 설계되었으며, 침전지 바닥에 슬러지 배출밸브를 설치하여 반송펌프로써 침전슬러지를 포기조 선단으로 반송하고 일부는 폐슬러지로 배출할 수 있도록 하였다.

또한, 최종침전지에 40cm간격으로 시료채취구를 설치하여 침전특성을 조사할 수 있도록 제작하였다. 급속여과지는 직경 120mm, 높이 280cm, 최대 LV(Linear Velocity) 263m/day 로 설계되었으며, 충전여과로는 유효입경 1.62mm, 균등계수 1.33의 안사라사이트(충진깊이 60cm)와 유효입경 0.61mm, 균등계수 1.26의 모래(충진깊이 40cm)의 2층 여과지로 구성되었다. 여과지 저부에는 역세척을 위한 밸브와 미세산기관을 설치하여 물과 공기를 공급할 수 있도록 하였다.

2.2 실험방법

실험기간 동안의 운전조건은 Table 1, 유입하수 수질특성은 Table 2에 나타내었다. Pilot Plant의 표준

Table 1. Experimental conditions of rapid filter

Diameter	120 mm
Height	280 cm
LV	100-150 (m/day)
Packed Media	Sand + Anthracite
Anthracite	
Effective Size	1.62 mm
Coefficient of Uniformity	1.33
Packed Depth	60 cm
Sand	
Effective Size	0.61 mm
Coefficient of Uniformity	1.26
Packed Depth	40 cm

Table 2. Characteristics of raw water quality

Parameter	Unit	Influent Wastewater Concentration
Water Temp.	℃	15 ~ 30
pH	-	6.6 ~ 7.6
SS	mg/L	100 ~ 200
ABS	mg/L	2.4 ~ 20
KMnO ₄ Consump.	mg/L	100 ~ 200
COD _{Mn}	mg/L	60 ~ 80
NH ₄ -N	mg/L	30 ~ 80
PO ₄ -P	mg/L	1.6 ~ 9.9
BOD	mg/L	80 ~ 120
TOC	mg/L	19 ~ 48
Alkalinity	mg/L	150 ~ 200
Hardness	mg/L	330 ~ 380
Color	Unit	350 ~ 550
Turbidity	Unit	80 ~ 150
T - N	mg/L	20 ~ 90
T - P	mg/L	1.5 ~ 11
Ca	mg/L	70 ~ 80
Cl	mg/L	500 ~ 800
SO ₄	mg/L	90 ~ 350

활성슬러지 시스템의 포기조 MLSS농도는 1500~2500mg/L, DO 2~5mg/L, SVI는 70~150을 유지하였으며, 슬러지 반송비는 0.25였고 잉여슬러지는 하루에 두 번 계외로 배출되었다. 급속여과지는 모래와 안트라사이트의 2층 여과로 총진깊이는 100cm (모래 40cm + 안트라사이트 60cm)이고 손실수두 여유고는 90cm를 두었다. 여과속도는 100~200m/day 정도이며, 역세는 실험 결과에 의해 1.5일 정도가 적당하였

으나 1일을 역세주기로 하였다. 수질분석 방법은 Table. 1에 나타난 바와 같이 수질오염공정시험법 (1999), 日本下水試験方法(1993) 및 STANDARD METHODS(1992)에 의해 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 여과속도에 따른 처리특성

최종침전지 유출수를 원수로 하여 여과속도에 변화를 주며 운전하여 여과지속시간에 따른 처리수의 농도변화를 조사하고 유출수 수질의 재이용 적합성 판단과 역세척 주기를 파악하였다. Fig. 2는 여과속도와 여과지속시간에 따른 COD_{Mn}제거를 나타낸 것으로 여과공정에서 30% 이상의 제거를 기대하기 어려우며 10시간 이상 운전 시 여과속도 100m/day, 150m/day, 200m/day 모두에서 그 제거율이 20% 이하가 되었다. 그러므로, 여과지에서의 COD_{Mn}제거는 여과지의 운전조건보다는 최종침전지 유출수의 농도에 좌우되는 것으로 사료된다. 중수도 기준은 COD_{Mn}의 경우 20mg/L이므로 이 조건을 만족하기 위해서는 표준활성슬러지공법의 보다 효율적인 운전과 추가공정이 요구된다. Fig. 3은 여과속도를 달리하였을 경우의 여과지속시간에 따른 색도의 변화를 나타낸 것이다. 우리나라 중수도 수질기준으로 색도의 기준치는 정하여 있지는 않으나, 외국의 경우 친수용이나 조경용으로 사용하기 위해서는 40도 이하가 되어야 하는데, 여과속도 100m/day, 150m/day, 200m/day 모두 이 조건을 만족시키지 못하였다. Fig. 4는 여과속도와 여과지속시간에 따른 탁도의 변화를 나타낸 것으로, 중수도의 기준인 5 이하를 만족하기 위해서는 100 m/day, 150m/day에서 각각 40시간, 10시간 정도의 여과 지속시간으로 이 기준을 만족시킬 수 있었으며 여과속도 200m/day의 경우는 그 조건을 만족시킬 수 없었다.

3.2 여층깊이에 따른 제거특성

여과지의 여층깊이에 따른 제거특성을 살펴보기 위해 여층깊이 별 SS농도와 COD_{Mn}농도를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 5에서 최종침전지 유출수 SS농도가 15, 17, 20, 22mg/L일 때여과지 전체 SS 제거율 60~70% 중 60cm 이내의 Anthracite층에서 거의 50~60%를 특히 상부 30cm 이내에서 40~50%의 제거효율을 보이는 표층여과 형태를 나타내었다. Fig. 6에서 최종침전지 유출수 COD_{Mn}농도가 8.2,

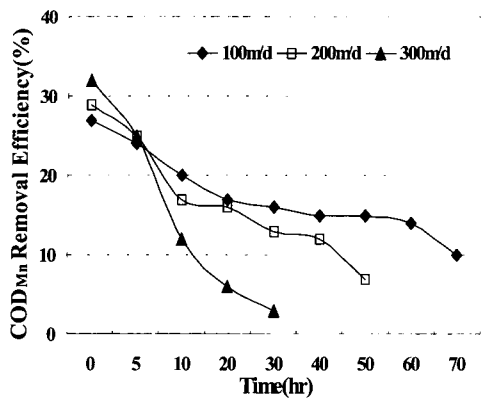


Fig. 2 COD % removals versus hours of filter run at three different filtration rates.

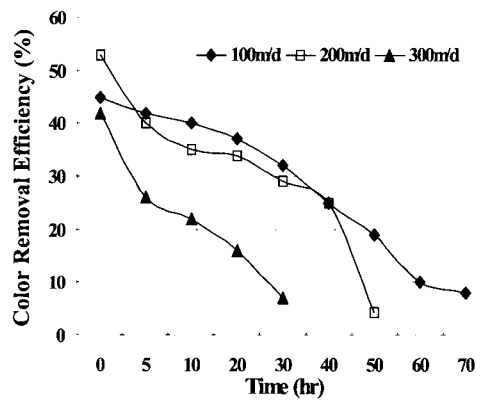


Fig. 3 Color % removals versus hours of filter run at three different filtration rates.

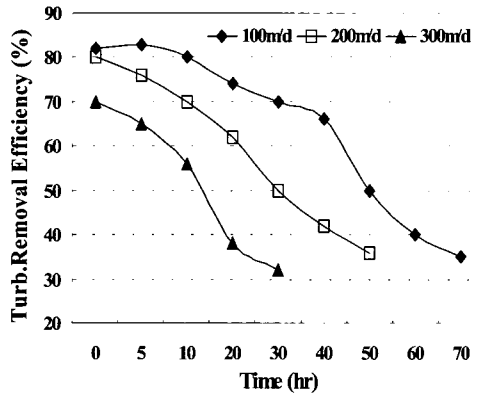


Fig. 4 Turbidity % removals versus hours of filter run at three different filtration rates.

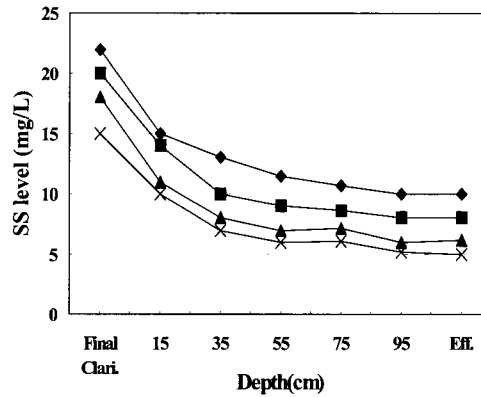


Fig. 5 SS profile in filter beds.

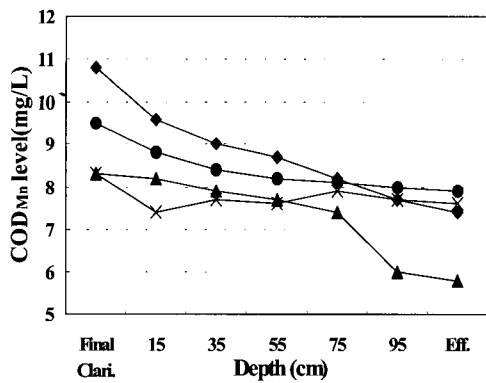


Fig. 6 COD_{Mn} profile in filter beds.

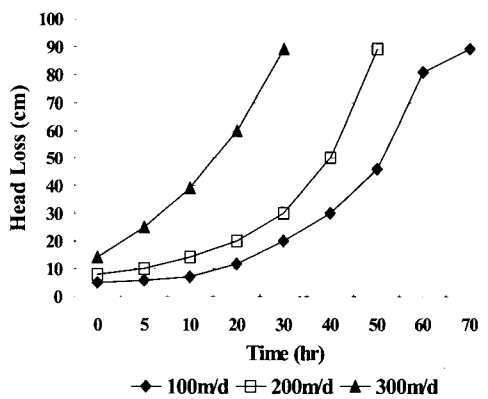


Fig. 7 Headloss versus filter run at three different filtration rates.

8.3, 9.3, 10.8mg/L일 때 여과지에서의 COD_{Mn} 처리 효율은 30% 이하의 낮은 효율로 SS 경우에서처럼 여층 별로 두드러진 변화를 나타내지는 않았다.

3.3 여과속도별 손실수두 변화

Fig. 7은 각각 여과유속과 지속시간에 따른 손실수두의 변화를 나타낸 것이다. 손실수두가 보통 2m 정도가 되어야 역세척 주기가 되는데 본 실험은 여건상 90cm 이상 손실수두의 관측이 불가능하였으므로 약 1m를 그 주기로 보고 관측하였다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 손실수두가 90cm 까지 되는데 여과속도 100m/day, 150m/day, 200m/day로 운전 시 각각 70hr, 50hr, 30hr 정도의 여과 지속시간을 가질 수 있음을 알 수 있었다. 이상의 결과를 종합하여 볼 때 중수도로 사용하기 위한 수질을 얻기 위해 표준활성슬러지법에 급속여과공정만 연계할 경우 여과속도 100m/day와 여과지속시간 40hr이하로 운전하는 것이 효과적임을 알 수 있었다.

3.4 역세척 특성

여과지 역세척은 역세척 시 공기세정과 수세정의 시간을 각각 달리하여 세정유출수의 색도와 탁도를 시간에 따라 측정하여 최적 역세척 시간을 파악할 수 있었다. Table 3은 RUN 1에서 RUN 4까지의 역세척 시간 및 역세척 수량을 나타낸 것이고 Fig. 8과 Fig. 9는 각각역세척 시간 별 세정유출수의 색도와 탁도의 변화를 나타낸 것이다.

Fig. 8과 Fig. 9에서 색도와 탁도 모두가 5분 이상 경과하여야 안정화되어짐을 알 수 있었다. Susmu Kawamura(2000)는 pilot scale과 실시설 여과지 운전에 근거하여 적절한 역세척을 통해 초기 탁도 과과는 최소화 될 수 있으며, 이때 탁도는 10에서 15 NTU이었다고 밝혔다. 또한 이같은 현상은 보통 규칙적인 역세척(공기세정을 하지 않은) 이후 5~6분 경과 후에 일어난다고 했는데 본 연구에서는 공기세정과 수세정의 이상적인 조합으로 인해 역세척 종료 후 5분 경과 후에 탁도가 6도 이하로 떨어지는 결과를 확인할 수

Table 3. Backwash conditions of the rapid filter (Unit; ' :Min, " :Sec)

Condition	RUN 1	RUN 2	RUN 3	RUN 4
Air	1' (1')	50" (50")	50" (50")	40" (40")
Air + Water	1' 30" (30")	1' 30" (40")	1' 30" (40")	1' 30" (50")
Water	2' 30" (1')	2' 30" (1')	2' 30" (1')	2' 30" (1')
Air + Water	3' (30")	3' (30")	3' (30")	3' (30")
Water	4' (1')	6' 30" (3' 30")	6' 30" (3' 30")	7' (4')
Rest	4' 30" (30")	7' (30")	7' (30")	7' 30" (30")
Drain	10' (5' 30")	9' (2')	9' (2')	9' 15" (1' 45")
Quantity	30 L	56 L	56 L	63 L

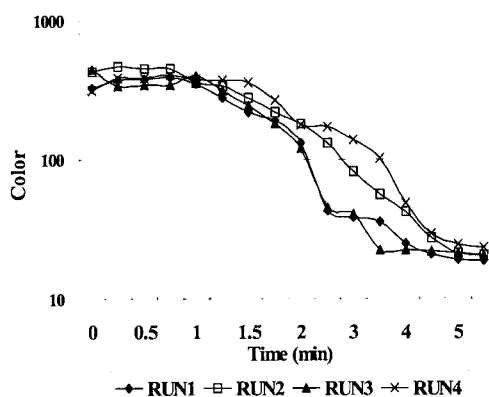


Fig. 8 Backwashing waste characteristics (color).

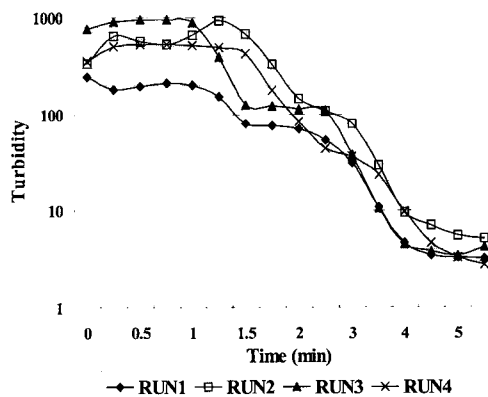


Fig. 9 Backwashing waste characteristics (turbidity).

Table 4. Treatment results of AS(Alum added)connected with filter

Parameters	R.W.	AS(Alum added)	Filter
pH (-)	6.6 ~ 7.6		
Temp (°C)	15 ~ 30		
COD(mg/L)	60~80	15~25	10~15
BOD(mg/L)	80~120	10~20	7~9
SS (mg/L)	100~200	15~20	5~10
PO4-P(mg/L)	4~7	1~1.5	0.2~0.4

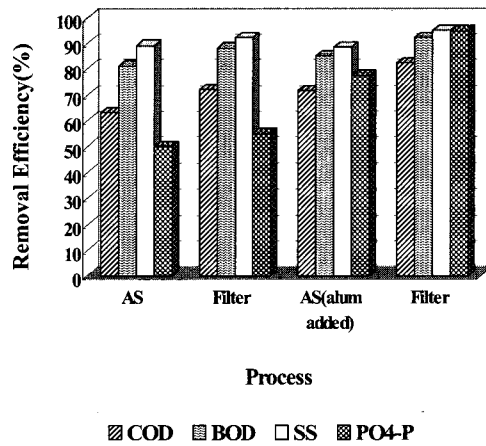


Fig. 10 Comparison of % removals between Activated Sludge connected with rapid filter and slum-added AS succeeded by rapid filter.

Table. 5 Comparison of reduction of pollutants between AS system and filtration process.(Unit : t/day)

Parameter	AS	Alum Added + Filter
COD	12~15	15~20
SS	26~54	28~57
T-N	1.5~6	3~15
T-P	0.3~0.9	1.4~3

Table. 6 Comparison between guideline of reuse water quality and results of Pilot Plant treatment

Parameter		guideline of reuse water				pilot plant	
		Miscellaneous	W.C	Land-scape	Industrial	AS + Filter	AS(Alum)+ Filter
Turbidity (K)	Unit	5	5	5	-	4	3
	(J)	-	-	10	-	-	-
BOD (K)	mg/L	10	10	10	-	8~10	7.9
	(J)	10	20	10	20	-	-
COD (J)	mg/L	-	Bio 20	-	-	15~20	<15
SS (J)	mg/L	-	30	-	-	<10	<10
Color	Unit	-	-	-	-	60~80	40~60
pH	-	5.6 ~ 8.6				6.6 ~ 7.8	

Table. 7 Comparison between guideline of industrial water reuse and results of Pilot Plant treatment (unit:mg/L)

Parameter	Industrial Irrigation (Dyeing)		Result of Pilot Plant treatment	
	1st grade	2nd grade	AS + Filter	AS Alum+ Filter
Turbidity	1	5	4	2~3
Alkalinity	50	50	100~120	40
Hardness	10	80	250	80
Cl ⁻	10	50	450	400
pH	6.5~ 7.5		6.6~ 7.6	
Fe	0.01	0.1	1.5	0.8
Mn	0.01	0.15	0.4	0.3

있었다. 그러므로, 본 실험에서는 공세(1분), 공세 + 수세(30초), 수세(1분), 공세 + 수세(2분), 수세(3분), 안정(30초), 배수(2분)으로 총 역세척 시간이 10분 정도가 적당함을 알 수 있었다. 역세척 수량은 여과수량의 약 2 % 정도이었다.

3.5 응집제 주입시 여과수질

활성슬러지 포기조 후단에 약품(Alum)을 첨가하는 경우, 먼저 적절한 약품 주입량을 결정해야 하는데, Alum의 주입목적은 인의 제거에 두었을 경우 Alum과 P의 반응은 몰비에 따라 인 1g 은 Al³⁺ 0.87g 과 반응한다. (Al : P = 27g : 31g = 0.87g : 1g) 마찬가지로 인 1g에는 Al₂(SO₄)₃ 11g이 반응함을 알 수 있다. 이용된 원수의 인의 농도가 5mg/L 정도이므로 필요한 Al₂(SO₄)₃는 55mg/L 임을 알 수 있으며, 통상 몰비의 2배를 주입하므로 110mg/L의 Alum이 주입되어야 함을 알 수 있다. 또한 jar test에 의해 적정 주입농도를 조사한 결과, SS와 PO₄-P의 경우로 볼 때 적정 Alum의 주입량은 100mg/L 정도로 판단되었다.

Table 4는 표준활성슬러지 시스템의 포기조 후단에 응집제를 주입, 침전을 행한 후 급속여과를 연계하여 실험을 수행한 결과를, Fig. 10은 약품주입 유무에 따른 처리효율을 비교한 결과를 나타내었다. Fig. 10에서 응집제첨가 활성슬러지와 급속여과를 수행한 결과가 활성슬러지와 여과를 연계한 경우보다 COD, BOD, 그리고 SS에 있어서는 각각 10%, 6%, 그리고 4%의 처리 효율 증대를 나타내었으며, 특히, PO₄-P의 제거는 40%의 처리효율 증대를 가져 왔다.

3.6 물질별 저감량

포기조 후단에 응집제 주입후 여과공정의 처리수가 물환경에 미치는 영향을 고려해보면 다음과 같이 예측할 수 있다. 1일 30만톤 규모의 표준활성슬러지 시스템에 의해 처리되는 J하수처리장의 경우 최종침전지 유출수와 포기조 후단에 응집제를 첨가한 후 여과지를 거친 경우를 비교하여 각 물질별 저감량은 Table 5와 같이 나타낼 수 있다. Table 5에 나타낸 바와 같이 기존 활성슬러지공법 보다는 약품첨가한 여과공정의 경우가 오염물질의 제거량이 훨씬 양호하였다. 1일 하수처리수량을 30만 톤/일로 볼 경우 COD 15~20톤/일 SS 28~57톤/일, T-N 3~15톤/일, T-P 1.4~3톤/일로 감축됨을 예측할 수 있다. 그러므로, 낙동강 하류부의 연안 해역으로의 오염부하량을 대폭 줄여서 쾌적한 물환경을 제공할 수 있으며, 재이용 수량만큼 새로운 수자원을 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

3.6 재이용 평가

Pilot Plant 실험결과에 근거하여 처리수의 재이용 평가를 위해 중수도 용도별 수질기준과 공업용수기준과 비교하여 Table 6과 Table 7에 나타내었다. Table 6과 Table 7에서 나타난 바와 같이 잡용수, 소제용수, 화장실용수, 공업용수(용도별로 다름)의 경우는 AS + Filter로서 처리시스템을 구성하면 충분히 이용 가능한 것으로 사료되며 조경용수의 경우는 자연환경 등을 고려하여 총인, 색도 성분의 저감화를 위해 활성슬러지에 약품(Alum)을 주입한 후 여과공정을 이용하는 것이 안정적인 것으로 판단된다. 공업용수로서 이용하기 위해

서는 용도별 수질기준을 만족시켜야하는데, 레미콘, 콘크리트, 염색 등은 높은 수질을 요구하며, 염색분야는 경도, 알칼리도, Cl⁻ 이온 등이 특히 문제시되는데 경도와 알칼리도는 연수화와 여과에 의해 기준치 이하로 내릴 수 있으며, 냉각수의 경우 색도, 냄새 및 미량 유기물을 제거하여야 하며, Cl⁻ 이온은 RO를 설치하면 경도와 알칼리도도 함께 요구수준으로 저하시켜 양질의 공업용수를 생산할 수 있을 것으로 판단되었다.

4. 결 론

하수 처리수의 재이용을 위하여 표준활성슬러지법에 의한 생물학적 처리 후 최종침전지 유출수를 급속여과 공정으로 처리하기 위한 Pilot Plant 실험연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 최종침전지 유출수를 급속여과공정으로 처리한 경우 여과속도는 100m/day, 여과지속시간은 40시간 이하로 운전하는 것이 타당한 것으로 사료되며, 여과지의 역세척 주기는 여과속도 100m/day 일때 40시간에 1회 정도가 되었다.
2. 여과지 역세척 시 그 역세방법은 공세 1분, 공세+수세 30초, 수세 1분, 공세+수세 2분, 수세 3분, 안정 30초, 배수 10분의 순으로 행하는 것이 효과적이었으며 수세속도는 10LPM으로 전체 여과수량의 2% 정도였다.
3. 표준활성슬러지 시스템에 의한 2차 처리수를 잡용수로 재이용 하기 위해서는 폭기조 후단에 응집제를 첨가하여 여과 공정을 후속공정으로 하는 시스템으로 가능하나, 공업용수등의 목적으로 이용할 경우는 용도별 목표수질에 맞는 공정이 추가되어야 함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- Metcalf & Eddy, Inc.(1991), *Wastewater Engineering, 3rd Ed.* McGraw Hill, pp. 1093~1094.
- 김 수원 (1994), "낙동강 유역의 다목적댐 건설이 수질환경에 미치는 영향과 대책", *水處理技術*, vol.2, NO.3, pp. 115~131.
- 建設部 (1994), *中水道 實務指針書(案)*, pp. 3~4.
- 한동우, 강용태, 김정현 (1995), "활성슬러지 공정과 급속여과공정 연계에 의한 처리특성과 처리수 재이용 시스템 구성." 대한토목학회 학술발표회 논문집(II), 대한토목학회, pp. 540~534.
- 수질오염폐기물토양오염 공정시험방법 (1998), 동화기술.
- 社団法人 日本下水道協会 (1994), *高度処理施設マニュアル(案)*, pp. 102.
- 日本下水道協会 (1993), *下水試験方法*.
- APHA AWWA WEF (1992), *STANDARD METHODS for the examination of water and wastewater, 18th edition.*
- Susumu Kawamura (2000), *Integrated Design and Operation of Water Treatment Facilities, second edition*, JOHN WILLY & SONS, INC., pp. 264~265.

(논문번호:02-07/접수:2002.01.19/심사완료:2002.04.01)