

국내 정수장 고도정수처리 공정에서 공정별 처리효율 조사

Investigation of Treatment Efficiency for Advanced Processes of Water Treatment Plants in Korea

문성민¹ · 최승일² · 손진식³ · 윤제용^{1,*}

Mun, Sung-Min¹ · Choi, Suing-Il² · Sohn, Jin-Sik³ · Yoon, Je-Yong^{1,*}

1 서울대학교 응용화학부

2 고려대학교 환경시스템 공학부

3 국민대학교 건설시스템 공학부

(2005년 2월 17일 논문 접수: 2005년 5월 25일 최종 수정논문 채택)

Abstract

Advanced processes such as ozonation or activated carbon filtration (ACF) in water treatment plants have been used in Korea since 1994. At present, seventeen drinking water treatment plants are currently operating. This survey compares the treatment performance of advanced processes in eight plants which have comparable water quality data. The three parameters (DOC, UV₂₅₄, and KMnO₄ consumption) of water quality were selected as an indicator of treatment efficiency.

The treatment efficiency of ozonation and ACF processes was found to vary with large deviations in each plant. Treatment efficiency of DOC, UV₂₅₄, and KMnO₄ consumption by post ozonation ranged from 3 to 11%, 6 to 33%, and 12 to 28% respectively. On the other hand, for ACF, treatment efficiency of DOC, UV₂₅₄, and KMnO₄ consumption ranged from 7 to 38%, 8 to 48%, and 16 to 66% respectively. These large deviations indicate the advanced processes of water treatment plants to be further optimized.

Key words: advanced water treatment process, treatment efficiency, Ozonation, Activated Carbon Filtration

주제어: 고도정수처리공정, 처리효율, 오존공정, 활성탄공정

1. 서 론

90년대 초반부터 국내 도입되기 시작한 고도정수처리공정은 10여 년 사이에 전국 17개 정수장에 도입

되어 운영 중에 있다(Table 1). 이와 같은 고도 정수 시설 도입사업은 환경부가 추진 중인 1994년부터 2006년까지 사업비 4,359억원(국고2,366억원)을 투입하여 전국의 21개 정수장에 고도정수시설을 도입하려는 사업의 일환이다. 고도정수처리공정이란 응

*Corresponding author Tel: +82-2-880-8927, FAX: +82-2-876-8911, E-mail: je Yong@snu.ac.kr (Yoon, J.Y.)

집, 침전, 여과공정을 거치는 통상의 정수방법으로 제거가 어려운 농약, 유기화합물질, 냄새물질, 트리할로메탄 전구물질, 색도, 음이온계면활성제 등의 처리를 목적으로 도입된 활성탄 및 오존 처리시설을 말한다(환경부, 1995).

고도정수처리공정은 주요 상수원인 낙동강, 금강 등의 수질이 나빠지면서 취수원 수질이 3급수 이하로 떨어져 기존 정수처리공정으로 안전한 먹는 물 공급이 어렵게 되었고 낙동강 수계의 빈번한 수질오염 사고로 인해 시민들로부터 먹는 물에 대한 민원이 증가하여 이러한 문제점을 해결하고자 도입되었다(최승일, 1995). 그러나 도입 당시 체계적인 연구 없이 단기간에 획일적으로 도입 되어 시설 도입목적에 대한 비판적인 의견이 많았고 원수 수질특성에 맞는 최적화된 공정을 도입했다고 할 수 없다(한무영, 1993; 박훈수 & 윤제용, 2001). 이러한 착오에도 불구하고 고도정수처리공정의 도입은 수도 분야의 투자 확대와 함께 정수장 종사자들의 긍지를 향상시키고 비교적 획일적이던 국내 정수기술의 다양성을 가져온 측면이 있다(윤제용, 2003).

국내 정수장에서 고도정수처리공정이 오랜 기간 운영되어 왔으나 시설, 운영, 공정 수질특성 등이 부분적으로만 개별 연구자들에 의해 보고되었을 뿐 체계적인 조사나 분석이 이루어지지 못하고 있다(오현제, 2003; 최승일, 1995; 윤제용, 2004). 국내 고도정수처리시설에 대한 이러한 분석 및 평가자료는 향후 추진될 2기 고도정수처리시설 도입을 위한 계획안을 만드는 환경부는 물론 현재 고도정수처리시설 도입을 추진 중인 서울시와 수자원공사에 좋은 참고자료가 될 것으로 생각한다.

따라서, 본 연구에서는 기존에 운영중인 고도정수처리 정수장에 대해 공정별 처리효율 조사와 정수장 상호간 처리효율 비교를 통해 고도정수처리공정 도입에 따른 수질개선 정도와 처리효율 현황을 파악하고자 하였다.

2. 이론 및 연구 방법

2.1. 조사방법

국내 고도정수처리공정에서 처리공정별 전반적인 효율을 파악하기 위하여 고도정수처리공정이 도입되

어 운영 중인 17개 정수장에 수질자료를 수집하여 분석하였다. 국내 정수장 고도정수시설 공정별 도입현황은 Table 1에서 볼 수 있듯이 후오존과 활성탄 연계 8개소, 전·후오존과 활성탄 연계 6개소, 활성탄 단독 3개소이며, 보다 자세한 내용은 환경부 보고서(윤제용 등, 2004)를 참조하기 바란다.

분석대상이 된 고도정수처리 공정별 수질자료는 2002년 9월부터 2003년 8월까지 1년간의 자료이며 추가로 2001년 환경부 지자체 고도정수처리시설 운영평가 당시 조사되었던 수질검사 결과(2000년 10월부터 2001년 9월까지)도 함께 비교하였다. 편의상 2002년 9월부터 2003년 8월까지의 기간은 2003년도 수질로 2000년 10월부터 2001년 9월까지의 기간은 2001년도 수질로 표현하였다.

환경부 고도정수처리시설의 정수 수질검사 지침에 의하면 고도정수처리시설의 정수 효과를 객관적이고 체계적으로 분석·종합하고, 앞으로의 수도정책에 필요한 기초자료를 확보하기 위하여 주요 측정항목 15개 (THMFP, TOC, DOC, UV₂₅₄, 2-MIB, Geosmine, Bromide 및 Bromate, 암모니아질소, KMnO₄ 소비량, 세제, 철, 망간, 탁도, THM, 페놀)와 정기 측정항목 47개(먹는물수질기준 55개 항목 중 주요측정항목에 포함된 8개 항목을 제외한 것)에 대해 각각 월 2회, 1회 측정하도록 하고 있다. 따라서 본 조사에서는 고도정수처리 공정별 처리효율 평가를 위해 7개 항목(THMFP, THM, DOC, UV₂₅₄, 암모니아질소, KMnO₄ 소비량, 탁도)에 대해 자료를 조사하였고 이중에서 오존 및 활성탄공정의 처리효율을 잘 반영하는 DOC, UV₂₅₄, KMnO₄ 소비량 세 항목을 고도정수처리공정 처리효율 평가 지표로 선정하였다.

DOC는 수중에 용존된 유기물의 탄소량으로, 소독 부산물의 전구체가 되며 관망에서 공급되는 수도물의 생물학적 수질을 저하시킬 수 있다. UV₂₅₄는 자외선 파장 254nm에서 흡광하는 물질인 방향족 물질, 불포화·포화 지방족 물질로 수중에서 난분해성 물질의 지표로 사용된다. KMnO₄ 소비량은 아질산염, 1가철염, 망간 그리고 기타 용존 유기물질들의 산화에 소비되는 양을 나타내며 물의 오염 정도를 간접적으로 나타낸다(환경부, 2001).

이들 세 항목에 대해 착수정, 모래여과수, 후오존 처리수, 활성탄여과수 공정별로 수질결과를 확보하고

Table 1. 고도정수시설 설치 정수장 현황

정수장 명	소재지	시설용량(천m ³ /일)	시설내용	오존주입 농도(mg/L)	EBCT(분)	준공일
PH	부산시	600	전·후오존+활성탄	0.5~3.0	15	'94. 04.
TD	대구시	310	후오존+활성탄	0.1~3.0	10	'97. 04.
TM	대구시	800	후오존+활성탄	0.1~3.0	10	'98. 07.
MC	마산시	400	전·후오존+활성탄	0.15~3.0	11	'98. 10.
KD	동두천시	60	임상활성탄	-	16	'98. 12.
KO	공주시	28	후오존+활성탄	-	30	'98. 12.
JS	진해시	70	전·후오존+활성탄	2.5~4.0	26	'99. 03.
UH	울산시	270	후오존+활성탄	3.0	14	'99. 11.
KJ	군산시	38	분말·임상활성탄	-	10	'99. 11.
PM	부산시	277	전·후오존+활성탄	2.5	15	'99. 12.
YB	양산시	37.5	후오존+활성탄	1.0	10~15	'99. 12.
OJ	원주시	85	임상활성탄	-	11	'00. 03.
PD	부산시	1차: 1,055 2차: 500	전·후오존+활성탄	-	-	'00. 07.
JS*	진해시	165	전·후오존+활성탄	-	20	'01. 04.
YU	양산시	55	후오존+활성탄	1.0	16~18	'01. 12.
UC	울산시	60	후오존+활성탄	-	-	'02. 02.
KM	김해시	210	전·후오존+활성탄	0.8	-	'03. 02.

* 표기는 JS 정수장과 다른 정수장을 의미

Table 2. 수질검사결과표

검사항목	고도정수 목표수질	검 사 결 과(mg/L)					처리효율(%)		비 고
		①	②	③	④	⑤	고도정수		
		착수정	모래 여과수	후오존처리수	활성탄 여과수	기존정수	⑥ 후오존	⑦ 활성탄	
1. DOC									
2. UV ₂₅₄									
3. KMnO ₄ 소비량									

자 하였다. 환경부 고도정수처리시설 정수 수질검사 지침(가안)에 따라 기록하고 있지 않거나 운영상의 문제로 수질자료가 없는 정수장 등이 있어 동등한 처리효율 비교를 위해 다음의 두 가지 전제조건을 선정하여 이에 해당되는 정수장만을 상호 비교 하였다. 첫째, 후오존과 활성탄 공정으로 연계 운영하는 정수장에 대하여 조사한다(전오존공정은 고려하지 않음). 둘째, 각 공정별 처리효율을 비교할 수 있는 정수장으로 한정한다. 위의 두 가지 전제조건을 모두 만족하는 2003년도 8개 정수장(PH, PM, PD, TD, TM, UH, MC, UC)과 2001년도 5개 정수장(PH, PM, PD, TD, UH)을 선정하여 후오존 및 활성탄 공정 처리효율을 비교하였다. 본 조사대상에 포함되지 않는 11개 정수장의 내용은 다음과 같다. 활성탄

단독 공정 정수장 3개소, 조사기간 중 오존공정 가동 중단 1개소, 공정별로 수질결과를 기록하지 않은 곳 5개소이다. 오존공정의 문제로 가동을 중단한 정수장에서는 문제 해결에 어려움을 겪고 있었으며, 공정별로 수질결과를 기록하고 있지 않은 정수장에서는 기존 모래여과공정과 추가로 도입 운영중인 오존 및 활성탄공정의 운영상 차이점을 잘 인식하고 있지 못한 것으로 나타났다.

2.2. 처리효율 산출

본 조사에서 사용된 모래여과수, 후오존처리수, 활성탄여과수 처리효율 산출은 환경부 고도정수처리시설 정수 수질검사 지침(가안)에 근거하여 다음의 Table 2와 식 (1), (2), (3)에 의해 산출하였다.

Table 3. 수질항목별 모래여과공정 연평균 처리효율

정수장	DOC		UV ₂₅₄		KMnO ₄ 소비량	
	원수농도(mg/L)	평균제거율(%)	원수농도(cm ⁻¹)	평균제거율(%)	원수농도(mg/L)	평균제거율(%)
PH	3.21	35	0.495	55	8.47	67
PM	2.51	37	0.043	78	6.37	73
PD	3.03	35	0.049	44	8.01	59
TD	2.89	31	0.217	62	8.12	59
TM	2.97	35	0.232	64	8.55	65
UH	3.57	38	0.112	73	6.29	60
MC	2.97	64	0.106	62	9.36	41
UC	3.41	40	0.071	67	6.62	61
평균	3.07(±0.3)	39(±10.3)	0.166(±0.2)	63(±10.5)	7.72(±1.2)	60(±9.3)

(2002년 8월~2003년 9월 기간 중)

- ① 기존정수 처리효율: $(\text{①} - \text{②}) \div \text{①} \times 100$ ---(1)
- ② 후오존 처리효율: $(\text{②} - \text{③}) \div \text{②} \times 100$ ---(2)
- ③ 활성탄 처리효율: $(\text{③} - \text{④}) \div \text{③} \times 100$ ---(3)

식 (1)은 기존정수 처리효율로 모래여과 공정에 의한 처리효율을 나타내며, 식 (2)는 고도정수 처리효율 중 후오존 공정에 의한 처리효율을 식 (3)은 활성탄 공정에 의한 처리효율을 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 기존 정수처리 효율

고도정수처리공정 처리효율을 비교하기에 앞서 기존 정수처리 공정의 모래여과공정에 의한 처리효율을 정수장별로 살펴보았다. Table 3은 2003년도 조사대상 8개 정수장 상수원수의 연평균 농도와 모래여과 공정에 의한 연평균 처리효율을 나타낸다.

Table 3에서 보면 모래여과공정에 의한 DOC, UV₂₅₄, KMnO₄ 소비량의 연평균 처리효율은 각각 39 (±10.3)%, 63 (±9.3)%, 60 (±10.5)%로 나타났으며, 모래여과 처리수 농도는 각각 DOC 1.88mg/L, UV₂₅₄ 0.062cm⁻¹, KMnO₄ 소비량 3.1mg/L였다. 조사대상 8개 정수장 대부분의 고도정수처리시설에서 목표수질로 KMnO₄ 소비량 5mg/L 이하, DOC 2mg/L 이하로 운영되고 있음을 볼 때 모래여과 공정의 처리효율이 비교적 높은 것을 알 수 있다. 그러나 Table 3의 결과는 연평균 처리효율로 이를 초과하는 경우도

Table 4. 모래여과공정에 의한 DOC 2mg/L, KMnO₄ 소비량 5mg/L 초과 월 수

정수장	DOC 2mg/L 초과 월 수	KMnO ₄ 소비량 5mg/L 초과 월 수
PH	8	0
PM	0	0
PD	6	0
TD	5	0
TM	6	0
UH	8	0
MC	3	1
UC	8	0

(2002년 8월~2003년 9월 기간 중)

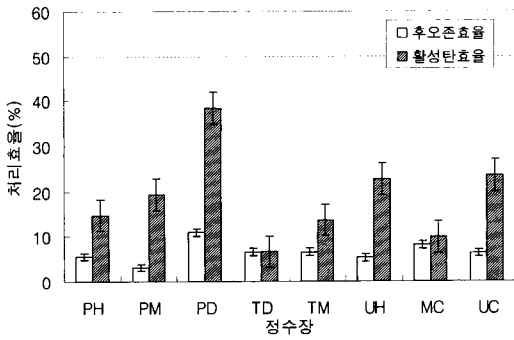
존재한다. Table 4는 모래여과공정 처리수 수질이 KMnO₄ 소비량 5mg/L, DOC 2mg/L를 넘는 1년 중 월 수를 나타낸 결과이다. Table 4에서 볼 수 있는 바와 같이 DOC 2mg/L를 초과하는 경우는 여러 정수장에서 관찰되었고, KMnO₄ 소비량 5mg/L를 초과한 정수장은 한 곳이었다.

3.2. 후오존 및 활성탄공정 처리효율

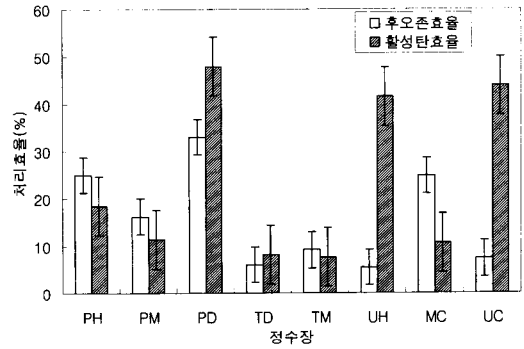
정수장별 고도정수처리공정의 처리효율을 비교하기 위하여 후오존과 활성탄 각 공정별로 DOC, UV₂₅₄, KMnO₄ 소비량 수질항목별로 처리효율을 비교하였다. 자료조사 시 각 고도정수처리시설의 오존 주입 농도 및 활성탄 접촉시간(EBPT)은 Table 1에 나타내었다.

3.2.1. 공정별 DOC 처리효율

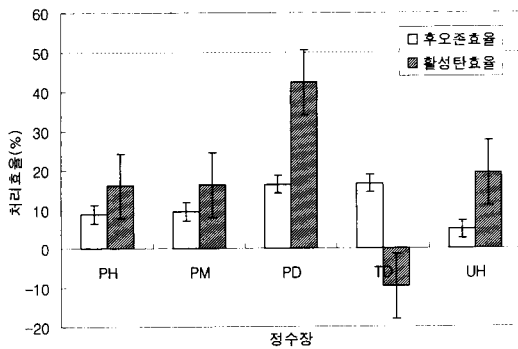
Fig. 1(a)는 8개 정수장의 2003년도 후오존과 활성



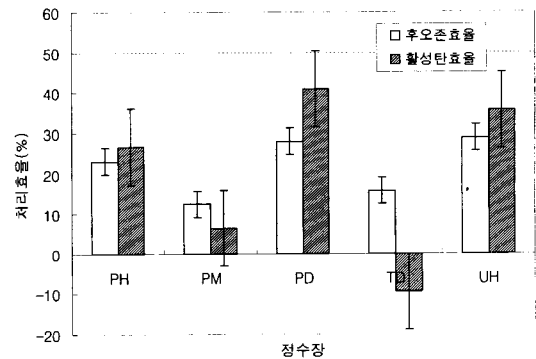
(a) 8 개 정수장 (2002년 9월 ~ 2003년 8월)



(a) 8 개 정수장 (2002년 9월 ~ 2003년 8월)



(b) 5 개 정수장 (2000년 10월 ~ 2001년 9월)



(b) 5 개 정수장 (2000년 10월 ~ 2001년 9월)

Fig. 1. 후오존 및 활성탄 공정에서 DOC 연평균 처리효율.

Fig. 2. 후오존 및 활성탄 공정에서 UV₂₅₄ 연평균 처리효율.

탄 공정에 의한 DOC 연평균 처리효율을 나타낸다. 8개 정수장의 후오존 공정에 의한 DOC 연평균 처리효율은 평균 7%이고 분포는 3~11%로 나타났다. 활성탄 공정에 의한 DOC 연평균 처리효율은 평균 19%이고 분포는 7~38%로 나타났다. Fig. 1(a)에서 활성탄 공정에 의한 DOC 연평균 처리효율은 매우 큰 차이를 보였다. 이처럼 처리효율에 큰 차이를 보이는 이유는 정확히 알 수는 없지만 오존 및 활성탄 공정이 최적의 조건으로 운영되고 있지 않음을 나타낸다.

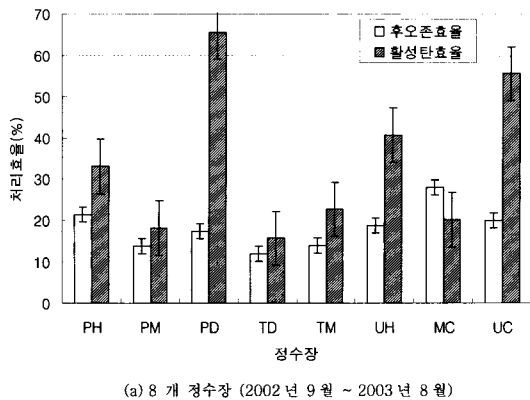
Fig. 1(b)는 5개 정수장의 2001년도 후오존과 활성탄 공정에 의한 DOC 연평균 처리효율을 나타낸다. 후오존 공정에 의한 DOC 연평균 처리효율은 평균 11%이고 분포는 5~17%로 나타났다. 활성탄 공정에 의한 DOC 연평균 처리효율은 평균 17%이고 분포는 -10~42%로 나타났다. 2001년도 역시 정수장별로 처리효율 차이가 크게 나타났으며 일부 정수장의 활성

탄 처리효율은 마이너스(-)로 나타나 이 기간에 활성탄 공정에 의한 DOC 처리효율이 불량한 것으로 나타났다.

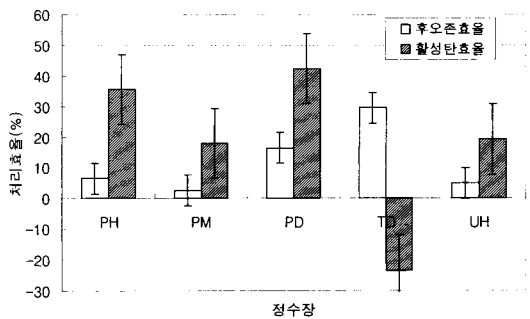
3.2.2. 공정별 UV₂₅₄ 처리효율

Fig. 2(a)는 8개 정수장의 2003년도 후오존과 활성탄 공정에 의한 UV₂₅₄ 연평균 처리효율을 나타낸다. UV₂₅₄ 연평균 처리효율 경향은 DOC 연평균 처리효율의 경향과 유사하였으며 정수장별 후오존 공정에 의한 UV₂₅₄ 연평균 처리효율은 평균 16%이고 그 분포는 6~33%로 나타났다. 활성탄 공정에 의한 UV₂₅₄ 연평균 처리효율은 평균 24%이고 그 분포는 8~48%로 나타났다. Fig. 2에서 보이는 바와 같이 UV₂₅₄ 연평균 처리효율 편차는 DOC 연평균 처리효율 편차보다 큰 것으로 나타났으며 특히 후오존 공정에 의한 편차는 더욱 큰 것으로 나타났다.

Fig. 2(b)는 5개 정수장의 2001년도 후오존과 활성탄 공정에 의한 UV₂₅₄ 연평균 처리효율을 나타낸다.



(a) 8개 정수장 (2002년 9월 ~ 2003년 8월)



(b) 5개 정수장 (2000년 10월 ~ 2001년 9월)

Fig. 3. 후오존 및 활성탄 공정에서 $KMnO_4$ 연평균 처리효율.

후오존 공정에 의한 UV_{254} 연평균 처리효율은 평균 21%이고 그 분포는 12~28%로 나타났다. 활성탄 공정에 의한 UV_{254} 연평균 처리효율은 평균 20%이고 그 분포는 -9~41%로 나타났다.

UV_{254} 연평균 처리효율에 있어서도 정수장별로 차이가 크게 나타났으며 일부 정수장의 활성탄 공정은 마이너스(-) 처리효율을 나타내 이 기간 UV_{254} 처리효율이 불량함을 보이고 있다.

3.2.3. 공정별 $KMnO_4$ 처리효율

Fig. 3(a)는 8개 정수장의 2003년도 후오존과 활성탄 공정에 의한 $KMnO_4$ 소비량 연평균 처리효율을 나타낸다. $KMnO_4$ 소비량 연평균 처리효율은 앞의 DOC, UV_{254} 경향과 유사하나 처리효율은 상대적으로 높은 것으로 나타났다.

후오존 공정에 의한 $KMnO_4$ 소비량 연평균 처리효율은 평균 18%이고 그 분포는 12~28%로 나타났다. 활성탄 공정에 의한 $KMnO_4$ 소비량 연평균 처리효율

은 평균 34%이고 분포는 16~66%로 나타났다. 활성탄 공정에 의한 $KMnO_4$ 소비량 연평균 처리효율은 DOC 및 UV_{254} 연평균 처리효율 보다 상대적으로 높게 나타났으며 높은 처리효율을 보이는 정수장과 그렇지 않은 정수장 간의 처리효율 편차가 가장 크게 나타난 수질 항목이다.

현재 고도정수처리 공정 중 활성탄 공정을 운영하는 경우 목표 수질의 근거가 미약하여 개별 정수장에 따라 상당한 혼동을 가져오고 있다. 일부 정수장의 경우 활성탄 교체에 대한 주기나 목표수질을 자체적으로 설정하는 경우도 있다. 따라서 정수장마다 활성탄을 교체하지 않은 경우도 있고 교체한 경우 교체시기가 다르기 때문에 활성탄 공정 처리효율에 차이가 있을 수 있다. Fig. 3(a)에서 볼 수 있는 바와 같이 정수장에 따라 처리효율에 큰 차이를 보이는 것은 활성탄 공정의 수질 관리 목표가 확실하며 활성탄 공정을 포함한 고도정수시설이 최적으로 운영되고 있지 못함을 간접적으로 보여준다고 할 수 있다.

Fig. 3(b)는 5개 정수장의 2001년도 후오존과 활성탄 공정에 의한 $KMnO_4$ 소비량 연평균 처리효율을 나타낸다. 후오존 공정에 의한 $KMnO_4$ 소비량 연평균 처리효율은 평균 12%이고 그 분포는 3~30%로 나타났다. 활성탄 공정에 의한 $KMnO_4$ 소비량 연평균 처리효율은 평균 18%이고 분포는 -23~42%로 나타났다. $KMnO_4$ 소비량 연평균 처리효율에 있어서도 정수장별 차이가 크게 나타났으며 일부 정수장의 활성탄 처리효율은 마이너스(-)로 나타나 이 기간 $KMnO_4$ 소비량 처리효율이 불량함을 보이고 있다.

4. 결 론

국내에서 운영중인 고도정수처리공정 도입 정수장에서 정수공정별 처리효율의 수질비교가 가능한 8개 정수장을 분석한 결과 대부분의 고도정수처리 공정에서는 모래여과공정 이후 추가적인 처리효율을 나타내어 기존 정수처리공정 보다 좋은 수질의 먹는 물을 생산하고 있는 것으로 확인되었다.

DOC, UV_{254} , $KMnO_4$ 소비량 3가지 수질항목을 통하여 알아본 고도정수처리 공정별 처리효율은 정수장별로 매우 큰 차이를 보였다. 오존 및 활성탄 공정에 의한 DOC 연평균 처리효율은 각각 3~11%,

7~38%, UV₂₅₄ 연평균 처리효율은 각각 6~33%, 8~48%, KMnO₄ 소비량 처리효율은 각각 12~28%, 16~66% 분포로 큰 차이를 보였다. 3가지 수질항목 중 활성탄 공정에 의한 KMnO₄ 소비량 처리효율이 가장 좋은 것을 알 수 있었다.

고도정수처리 시설의 수질관리 목표가 잘 설정되어 있지 않아 유사한 공정을 운영하고 있으면서도 정수장별 편차가 매우 큰 것으로 나타났다. 일부 정수장의 경우 고도정수처리공정의 처리효율이 미비하였고 처리효율을 평가할 수 있는 수질 측정도 체계적으로 이루어지지 않아 이에 대한 보완이 있어야 할 것으로 생각된다. 추가적으로 정수장 고도정수처리공정 도입 사업의 성공적인 정착을 위해서는 정수장별로 고도정수처리공정의 효율적인 운영을 위한 지속적인 정수공정의 최적화 노력과 운영요원의 전문화가 필요한 것으로 파악되었다.

감사의 글

본 연구의 일부는 2003년도 환경부 고도정수처리 정책방향에 관한 연구지원에 의해 이루어졌으며 연구

비지원과 자료를 제공해 주신 환경부 및 정수장 관계자 분들께 감사드립니다.

참고문헌

박훈수, 엄철민, 윤제용 (2001) 국내 정수처리 공정에서 오존공정시설의 현황과 특성, *상하수도학회지*, 15(4), pp. 279-292.

오세원, 최광호, 최수일, 손성섭 (1997) 낙동강수계 고도정수시설 도입을 위한 PILOT 실험연구, *상하수도학회지*, 11(1), pp. 88-98.

오현제 (2003) 고도정수처리의 국내의 사례 및 동향, 서울시 고도정수처리 도입을 위한 심포지엄 발표

윤제용 (2003) 서울시 정수장 고도정수처리시설 도입 필요성 검토, *수처리기술*, 11(3), pp. 23-34.

윤제용, 손진식, 최승일 (2004) 고도정수처리 정책방향에 관한 연구보고서, pp. 27, 환경부 보고서.

최승일 (1995) 우리나라 고도정수시설 도입의 현황과 허실, *한국물환경학회지*, 11(3), pp. 153-161.

한무영, 박중현 (1993) 고도정수처리 도입의 타당성 검토, *상하수도학회지*, 7(2), pp. 47-54.

환경부 (1995) 고도정수기술 Vol. I, pp. 17.

환경부 (2001) 지자체 고도정수처리시설 운영평가 보고서, pp. 190.