



상수원수 수질저하가 정수처리 비용에 미치는 영향

Effect of raw water quality decrease on water treatment costs

김진근
Jinkeun Kim

제주대학교 환경공학과
Department of Environmental Engineering, Jeju National University

pp. 239-250

pp. 251-258

pp. 259-266

pp. 267-276

pp. 277-288

pp. 289-301

ABSTRACT

In this study, effects of five raw water quality parameters (turbidity, odor compounds caused by algae, filter clogging caused by algae, pH increase caused by algae, and organic matter) on improvements and operations costs of typical water treatment plant (WTP) were estimated. The raw water quality parameters were assumed the worst possible conditions based on the past data and costs were subsequently estimated. Results showed that new water treatment facilities were needed, such as a selective intake system, an advanced water treatment processes, a dual media filter, a carbonation facility, and a re-chlorination facility depending on water quality. Furthermore, changes needed to be made in WTP operations, such as adding powered activated carbon, increasing the injection of chlorine, adding coagulation aid, increasing the discharge of backwashed water, and increasing the operation time of dewatering facilities. Such findings showed that to reliably produce high-quality tap water and reduce water treatment costs, continuous improvements to the quality of water sources are needed.

Key words: Algae, Operation and maintenance cost, Turbidity, Organic matter, Water treatment plant (WTP)

주제어: 조류, 운영관리비용, 탁도, 유기물, 정수장

Received 4 May 2020, revised 16 June 2020, accepted 15 July 2020.

*Corresponding author: Jinkeun Kim (E-mail: kjinkeun@jejunu.ac.kr)

• 김진근(교수) / Jinkeun Kim (Professor)
제주특별자치도 제주시 제주대학로 102, 63243
102, Jejudaehak-ro, Jeju-si, Jeju-do 63243, Republic of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

정수처리시설은 어떠한 경우에도 법에서 규정하고 있는 먹는물 수질기준을 준수해야 한다. 따라서 수질기준 준수를 위해서는 유입원수의 수질에 따라 다양한 수처리공정을 운영하게 되는데 이 과정에서 원수 수질에 대응한 수처리제를 사용하게 된다. 대표적인 수처리제로는 탁질 물질 제거를 위한 응집제, 병원성 미생물 제거를 위한 소독제, 응집효과 상승을 위한 응집보조제, 여과기능 향상을 위한 응집/여과보조제, 슬러지 탈수능 향상을 위한 고분자 응집제, 이취미 물질 제거를 위한 활성탄, 원수 pH 조절을 위한 산제 및 알칼리제 등이 있다. 이러한 수처리제는 원수수질에 따라 주입률의 차이가 발생할 수 있는데 원수의 수질이 저하될수록 일반적으로 수처리제의 주입률이 증가하게 된다.

또한, 추가적인 수처리제의 주입으로도 원수 수질저하에 대처가 어려울 경우에는 보다 안정적인 정수처리를 위해서 유기물 및 조류기인 이취미 물질 제거를 위한 고도처리시설, 여과지 막힘 개선을 위해 단일여재여과지에서 이중여재여과지로 시설개선, 최상의 상수원수 수질 취수를 위해 선택적 취수가 가능한 취수탑 설치, 수돗물 공급과정에서 적정 잔류염소 농도 유지를 위한 재염소 주입 시설 설치 등이 필요할 수 있다 (MOE, 2017a).

수도사업자 입장에서는 양질의 상수원수를 취수하여 최적의 처리를 통해 최상의 품질을 가지는 수돗물을 생산공급하는 것이 가장 바람직하다. 상수원수의 수질이 양호해야만 추가적인 정수처리시설의 설치 필요성이 없고 수처리제 주입량도 낮아져서 정수처리비용을 저감할 수 있다.

이와 같이 원수의 수질은 정수처리 시설비 및 운영비에 직접적인 영향을 미친다고 할 수 있으나, 기존 수도시설에서 원수의 수질이 당초 설계시보다 저하될 경우 추가로 소요될 수 있는 비용에 대한 연구는 거의 없는 상태이다. 따라서 본 연구에서는 원수 수질저하로 추가 소요가 예상되는 정수처리 시설설치비 및 운영비를 해당 상수원에서 발생가능한 최악의 수질조건을 가정하여 산정하였다. 이를 통해 상수원 수질개선사업 추진에 대한 타당성의 일부 근거를 제시할 수 있을 것으로 예상된다.

2. 연구방법

정수처리공정을 선정할 때 가장 중요한 요소중의

하나는 원수 수질이다. 2017년 기준으로 국내 정수처리시설은 원수 수질에 따라서 급속여과방식(56.9%), 고도처리방식(38.9%), 완속여과방식(1.9%), 소독만의방식(1.5%), 막여과방식(0.8%)을 적용하고 있으며 상수원은 댐(50.2%), 하천표류수(39.8%), 하천복류수(6.8%), 지하수(2.2%), 기타저수지(1.0%)로 구성되어 있다. 국내 수도시설은 대부분 댐 또는 하천표류수를 취수하여 급속여과방식 또는 급속여과+고도처리방식으로 운영되고 있다 (MOE, 2019a).

본 연구에서는 국내 상수도시설에서 가장 비율이 높은 호소수를 취수하는 급속모래여과시설을 대상으로 호소 수질저하에 따라 추가적으로 소요되는 정수처리 시설비 및 운영비를 추정하였다. 특정 오염물질의 유입으로 인한 수질사고 사례를 제외하고 호소 상류로부터의 일반적인 오염물질 유입 및 기상현상 등에 기인해 호소 내에서 발생가능한 오염물질의 농도 수준을 기존 자료 분석 등을 통해 가정하고 각각의 오염물질의 농도 증가에 따른 정수처리 비용 상승 정도를 산출하였다.

상수원인 호소의 수질이 저하될 경우 기존 정수처리공정에서 주로 문제가 발생하는 부분은 토사유입으로 인한 탁도 상승, 조류와 관련한 이취미 발생과 여과지폐색 및 원수 pH 상승, 유기물 농도 상승으로 인한 염소소독부산물 발생 증가 및 수돗물 공급과정에서 잔류염소 농도의 소모율 증가 등이다.

따라서 본 논문에서는 탁도, 조류 개체수, 유기물 농도의 증가로 인한 호소수의 수질저하를 가정하고 각각의 수질저하에 따른 추가적인 정수처리 시설비 및 운영비를 추정하였다. 정확한 정수처리 비용은 특정 상수원에서 실측한 수질자료를 바탕으로 산정하여야 하나, 본 논문에는 향후 원수 수질이 저하될 경우에 예상되는 국내 수도시설에서의 추가 정수처리 비용을 국내 주요 호소 상수원의 과거 수질자료를 토대로 발생 가능한 최악의 경우를 가정하여 추정하였다.

추가 정수처리 시설비 및 정수처리 운영비용 산정과 관련하여 고려된 가상의 수도시설은 호소수 취수-약품혼화-응집-침전-급속모래여과-액화염소소독-송수 및 배출수처리시설의 일반적인 급속여과시설로 구성된 가동률 75%, 시설용량 300,000 m³/일 규모의 정수시설이다. 또한, 수질오염물질의 유입농도, 발생기간 등은 국내 수도시설의 기존 운영자료를 바탕으로



대부분 최악의 상황을 가정한 내용이므로, 실제 특정 수도시설을 대상으로 정수처리 비용을 산정할 경우에는 현장여건에 적합한 자료를 바탕으로 재산정이 필요하다.

가상의 수도시설을 대상으로 합리적인 정수처리비용 산출을 위해 적용된 근거자료는 가상의 정수시설과 유사하게 호소수를 취수하고, 급속여과시설로 구성된 광역수도 A 정수장(Q = 325,000 m³/일)의 자료를 참고하였다. 정수처리비용 산출에 고려된 전력원단위는 수돗물 1 m³을 생산하는 과정에서 소요되는 전기요금(단위 : 원/m³)이며, 슬러지케익처분비원단위는 수돗물 1 m³을 생산하는 과정에서 발생하는 탈수 슬러지케익을 최종 처분하는데 소용되는 비용(단위 : 원/m³)이다. A정수장을 대상으로 파악한 전력원단위와 슬러지케익처분비원단위는 각각 81.05 원/m³, 3.12 원/m³으로 분석되었다.

전력비의 경우 A정수장을 대상으로 분석한 취수-정수처리-송배수 과정에서의 전력사용 비율은 Table 1과 같다. 정수처리 비용 산정과 관련하여 주요하게 고려된 여과지 및 배출수처리시설의 전력비가 총 전력비에서 차지하는 비율은 각각 0.0013, 0.0092로 나타났다. 한편 원수 수질 저하시 추가로 주입되는 응집제, 응집/여과보조제, 분말활성탄, 소독제 등의 수처리제는 2018년 기준 A정수장 등의 구매단가를 적용하였다 (K-water, 2019; K-water, 2020).

Table 1. Electricity usage in A water treatment plant (WTP) (K-water, 2020)

Process	Usage of electricity (kWh/yr.)	Portion (%)
Intake station	8,741,268	19.15
Receiving well	128,550	0.28
Mixing chamber	1,000	0.00
Coagulation basin	619,025	1.36
Sedimentation basin	123,043	0.27
Filter	60,488	0.13
Chlorination facility	2,319	0.01
Dewatering facility	418,031	0.92
Pump station	34,015,394	74.52
Booster pump station	1,534,565	3.36
Sum	45,643,683	100.00

3. 결 과

3.1 탁도 상승이 정수처리 비용에 미치는 영향

댐상류 농경지 등으로부터 토사 등이 유입될 경우 호소수의 탁도를 상승시킨다. 토사에는 입자물질뿐만 아니라 영양염류 및 유기물도 다량 포함되어 있지만 가장 큰 영향을 미치는 사항은 탁도상승이다.

국내의 대규모 저수지는 강우강도와 지속시간 등 수문 상황에 따라 호소별로 큰 편차를 보이거나 홍수기에 대부분 탁수가 발생한다. 하천에서 유입된 탁수는 저수지 상층부와의 밀도 차로 인해 저수지 중층을 따라 진행하며 성층화가 발생하는데 그 두께는 댐별로 5~30 m의 범위를 보인다. 탁수의 저수지 내 지체시간은 유역으로부터 유입하는 부유물질의 구성성분과 전도현상과 같은 저수지 내 흐름상태 및 여수로 수문 방류 등 저수지 운영방법에 의해 영향을 받는다 (Kim, 2007).

다목적댐에서 홍수 등으로 인한 탁수발생의 사례를 보면 경상북도에 위치한 임하댐은 '01년도 이전까지는 30 NTU 이상 발생된 탁수발생일수(방류수 기준)가 1~3개월 이내였고 최고탁도는 248 NTU를 기록하였다. 그러나, '02~'03년도는 탁수발생일수가 10개월 이상 지속되면서 최고 탁도도 1,221 NTU까지 나타났으며, 특히 '03년 태풍 매미 때에는 탁수발생이 315일간 지속되었다. 이러한 탁수 장기화는 임하호의 특정 수심에 분포하고 있던 탁수가 11월 수온변화에 의한 상하층 간 혼합현상으로 탁수가 전층으로 확산되어 발생한 것으로 파악되며, 탁수입자의 50% 이상이 0.5~10 μm의 침강 불량한 입자물질로 조사되었다 (Yum et al., 2007).

콜로이드 물질은 호소에서 침강성이 매우 불량하여 상수원수로 정수시설에 유입될 경우에는 응집제 주입을 증가, 슬러지 발생량 증가, 여과지속시간 단축으로 역세척 빈도 증가, 배출수처리시설 가동 시간 증가와 같은 정수처리비용 상승요인으로 작용하게 된다. 입자물질의 응집에 사용되는 응집제는 탁도와 비례관계에 있으며 탁도가 높을수록 슬러지 발생량이 증가하여 전체적인 수처리비용이 증가한다.

호소수의 탁도가 높을 경우 취수단계에서 고려할 수 있는 방안은 호소 수심별 탁수 발생 감시 및 예측을 통한 선택적 취수가 대표적이다. 이를 위해서는 취수문 형태의 표면취수설비를 표층에서부터 하부까지

원수 수질에 따라 선택적인 취수가 가능한 취수탑 형식으로 개선이 필요할 수 있다 (MOE, 2017a).

취수시설의 공사비는 식 (1)과 같으며, 이는 취수방식 및 양정이 고려되지 않은 함수식으로 취수시설 계획에 예상되는 총사업비 규모 추정시 활용될 수 있다 (MOE, 2016b).

$$Y = 705.42 \times Q^{0.6944} \quad (1)$$

여기서, Y : 비용 (백만원), Q : 시설용량 (천 m^3 /일)

식 (1)의 공사비 함수식에서 취수시설을 기존 지표수 취수형식에서 취수탑을 이용한 선택취수 형식으로 전환시 총 취수시설 공사비의 30%가 소요되는 것으로 가정하였으며, 이는 기존 취수구로부터 신설하는 취수탑까지의 이격거리, 취수탑의 설치 수심 등 현장 여건에 따라 공사비의 증감이 발생할 수 있다. 본 논문에서는 기존 취수시설에서 취수펌프 등은 그대로 사용하고 취수 형식만 지표수 취수 방식에서 수심에 따른 선택취수가 가능한 취수탑 시설로 개선하는 비용만 고려하였다. 선택 취수가 가능한 취수탑시설은

호소 수심별로 탁도, 조류 개체수 농도, 이취미 물질 농도, 유기물 농도, 원수 pH 등을 조사하여 최적의 수질을 취수할 수 있는 시설이므로, 탁수 유입뿐만 아니라 다른 오염물질 대응에도 유용하게 적용될 수 있다.

Table 2는 호소수를 취수하는 기존 수도시설에서 원수의 탁도상승으로 예상되는 정수시설의 효율저하를 방지하기 위한 시설개선 및 운영개선에 소요되는 비용 증가사항을 나타내고 있다. 기존 정수처리시설로 고탁수가 유입될 경우에는 응집제 주입률 증가를 통해 대응이 가능할 것으로 판단된다. 그러나 이 과정에서 침전슬러지 증가, 배출수처리시설의 가동시간 증가, 슬러지 발생량 증가에 따른 탈수 슬러지 처분 비용의 상승 등이 예상된다. 원수의 탁도 상승 정도에 따라 상이할 수는 있으나 집중호우가 발생하는 장마기 및 태풍시기 등의 기간을 약 2개월로 가정할 경우 해당 시기에 정수처리공정에서 응집제 주입률이 평균 10 mg/L 정도 증가가 예상된다. 이에 따라서 동일 기간 동안 침전슬러지 발생량 증가에 따라 탈수슬러지 케익의 발생량 및 탈수시설 전력비는 20% 증가하고, 여과지속시간은 25% 감소되어 역

Table 2. Estimated expenses for improvement and operation of WTP related to turbidity

	Contents	Calculation formula	Cost (10 ³ ₩/yr.)
Installation	- Water intake tower ¹⁾	- Installation of water intake tower 37,031,000,000 ₩ × 0.3	11,109,300 ¹⁾
	- Increase of coagulant dose ²⁾	- Coagulant dose × Period × Capacity × Operation rate × Coagulant cost 10 g/m ³ × 60 day/yr. × 300,000 m ³ /day × 0.75 × 243 ₩ / 1,000 g	32,805
Operation	- Increase of sludge cake due to high turbidity ³⁾	- Increase of sludge cake × Period × Capacity × Operation rate × Unit cost 0.2 × 60 day/yr. × 300,000 m ³ /day × 0.75 × 3.12 ₩/m ³	8,427
	- Increase of power usage due to frequent backwashing ⁴⁾	- Portion of power usage in filters × Increase of power usage × Period × Capacity × Operation rate × Unit cost 0.0013 × 0.5 × 60 day/yr. × 300,000 m ³ /day × 0.75 × 81.05 ₩/m ³	711
	- Increase of power usage at dewatering facilities ⁵⁾	- Portion of power usage in dewatering facilities × Increase of power usage × Period × Capacity × Operation rate × Unit cost 0.0092 × 0.2 × 60 day/yr. × 300,000 m ³ /day × 0.75 × 81.05 ₩/m ³	2,013
	(Sum)		(43,956)

Assumed conditions

- 1) 30% of total cost for intake station (unit : 10³ ₩/yr.) Costs was calculated base on the guideline of MOE (2016b). (unit : 10³ ₩/yr.)
- 2) 10 mg/L (g/m³) increase of coagulant (PACS) dose for 2 months
- 3) 20% increase of dewatered sludge cake for 2 months
- 4) 25% decrease of filtration duration time, 50% increase of backwashing frequency
- 5) 20% increase of power usage at dewatering facilities for 2 months



세척 빈도 및 여과지 전력사용량은 50% 증가하는 것으로 가정하였다.

3.2 조류 개체수 증가가 정수처리 비용에 미치는 영향

담상류에서 영양물질이 유입될 경우 가장 직접적인 영향은 호소 내 부영양화 현상을 유발하여 조류 개체수가 증가하는 현상이다. 조류는 물속에서 광합성을 하는 식물성 플랑크톤으로 수생태계 먹이사슬의 일차 생산자로 용존산소를 공급하고 동물성 플랑크톤의 먹이가 되는 등 육상의 식물과 같은 중요한 역할을 수행한다.

조류는 수생태계에서 필수적인 요소이지만 개체수가 과다할 경우에는 수자원의 이용에 매우 부정적 영향을 주게 된다. 조류의 개체수가 증가할 경우 상수원수 또는 정수처리과정에서 예상되는 주요 문제점은 이취미 발생, 여과지 막힘 발생, pH 상승 등이다.

3.2.1 이취미 관련

정부는 조류 발생을 주기적으로 모니터링하여 적절한 사전 대응을 위해 주요 상수원으로 이용되는 팔당호·대청호·충주호·주암호의 4개 호소를 대상으로 1998년부터 조류경보제를 시행하였으며, 2018년 말 기준 28개 하천 및 호소에서 조류경보제를 실시하고 있다. 국내 조류경보 발령 일수는 연도별로 증감이 있으나 증가 추세이며, 이로 인해 상수원수 중 냄새물질(geosmin, 2-MIB 등) 농도 및 발생일수도 증가 추세에 있다 (MOE, 2019b).

원수에서 지오스민 발생현황을 보면 2005~2016년 동안 한강 수계, 낙동강 수계, 대청호, 용담호, 보령호 대상 원수 중 지오스민 농도 20 ng/L 이하의 누적 발생률은 74%이며, 최대 발생 농도는 1,125 ng/L이고, 주로 6~9월 사이에 발생한다. 따라서, 20 ng/L를 초과하는 누적 발생률인 30%에 해당하는 연간 약 100일 정도(약 3개월)는 분말활성탄 주입 등의 추가적인 처리가 필요한 것으로 판단된다 (MOE, 2017b).

한편, 2005~2016년 동안 원수에서 2-MIB 발생현황을 보면 전국 정수장 원수 대상 20 ng/L 이하 누적 발생률은 91%이고, 최대 발생 농도는 156 ng/L이며, 연중 발생하고 있다. 따라서, 20 ng/L를 초과하는 누적 발생률인 10%에 해당하는 연간 약 30일 정도(약 1개월)는 분말활성탄 주입 등의 추가 처리가 필요한 것으로

판단된다.

급속여과시설에서 조류기인 이취미 물질 제거를 위해서는 저농도일 경우에는 분말활성탄 주입, 중염소 처리 등을 고려할 수 있다. 전염소를 중염소로의 전환 및 분말활성탄 주입을 통해 지오스민의 약 80~90%, 2-MIB의 약 30~40%를 제거 가능한 것으로 알려져 있다 (MOE, 2017b). 2011년 12월 한강수계에서 지오스민 고농도(최대 252 ng/L) 발생시 분말활성탄 30 mg/L 투입으로 평균 93.9%의 제거율을 나타내어 정수에서 20 ng/L 미만으로 유지한 바가 있다. 그러나 일정기간 일정 수준 이상의 이취미 물질이 유입될 경우에는 분말활성탄 단독 처리로는 목표 수질(급속여과시설에서 20 ng/L 이하) 달성이 어려워 추가로 고도처리시설의 도입이 필요하다.

원수에서 지오스민과 2-MIB의 발생기간이 중첩되지 않는다고 가정할 경우 급속여과시설에서 이취미 물질이 유입되는 기간은 과거 사례를 바탕으로 최대 4개월 정도이며, 이 경우 조류기인 이취미 물질 제거를 위해 분말활성탄 평균 주입률 20 mg/L (10~30 mg/L), 전염소 및 중염소 주입률 2.0 mg/L가 추가로 필요한 것으로 판단된다.

한편, 급속여과시설에서 중염소 및 분말활성탄으로 조류기인 이취미 물질의 제어가 어려울 경우에는 안정적인 이취미 물질 제거를 위해 오존산화 및 입상활성탄(GAC, granular activated carbon) 흡착공정으로 구성된 고도처리시설의 추가 설치가 필요하다.

고도처리시설의 세부 공정 구성에 따라 공사비에 차이가 발생할 수 있으나 기존 급속여과시설에서 고도처리시설을 증설할 경우에 소요되는 총공사비는 식 (2)와 같다. 한편, 급속여과시설, 고도처리시설(급속여과시설 포함), 고도처리시설(급속여과시설 미포함)의 운영비는 각각 식 (3), (4), (5)와 같다. 검토대상인 수도시설은 기존 급속여과시설에 오존산화+활성탄흡착지를 신설하여 운영하는 경우에 해당하므로 추가시설 운영에 따라 증가되는 운영비는 식 (5)를 적용하였다 (MOE, 2016b).

$$Y = 972.12 \times Q^{0.7503} \quad (2)$$

$$Y = -0.002 \times Q^2 + 10.517 \times Q + 500.6 \quad (3)$$

$$Y = -0.003 \times Q^2 + 18.373 \times Q + 514.97 \quad (4)$$

pp. 239-250

pp. 251-258

pp. 259-266

pp. 267-276

pp. 277-288

pp. 289-301

$$Y = -0.001 \times Q^2 + 7.856 \times Q + 14.37 \quad (5)$$

여기서, Y : 비용 (백만원), Q : 시설용량 (천m³/일)

한국수자원공사에서 고도처리공정을 운영중인 한강수계 및 낙동강 수계 정수장의 2015년 고도처리시설 운영비는 Table 3과 같다. 고도처리시설의 운영비는 처리공정 구성 및 유입수질에 많은 영향을 받으므로 수계별 정수장별 원단위의 차이가 발생할 수 있다. Table 3에 표기된 5개 정수장의 고도처리시설 평균 운영원단위는 19.86 원/m³이다. 식 (5)를 통해 산출된 고도처리시설 운영비는 연간 2,228,000,000원으로 시설용량 300,000 m³/일, 가동률 75%를 고려할 경우 예상되는 고도처리시설 운영원단위는 27.13 원/m³이다 (K-water, 2020; MOE, 2017b).

원수에서 조류에 의한 이취미 물질의 농도가 높을 경우에 급속여과시설에서는 분말활성탄 주입 등을 통해 대응하게 되는데 이 경우 급격한 정수처리비용 증가가 발생하게 되며, 고도처리시설을 운영중인 정수장의 경우에도 이취미 물질 농도 증가에 따라 오존주입률 등이 비례적으로 증가하게 되며, 활성탄흡착지의 사용기간 단축으로 활성탄 재생비용이 상승하게 되어 정수처리 비용이 증가하게 된다.

Table 4는 조류로 인한 이취미 물질 유입시 팔당수계 정수장을 대상으로 수처리제와 고도처리시설 전력

비를 중심으로 평가한 정수처리비용 비교 자료이다. 급속여과시설로 구성된 B정수장의 경우 현장에서 대처가능한 방법은 분말활성탄주입, 중염소 주입 등인데 이로 인해서 수처리제 비용이 329% 정도 급격하게 상승하는 것으로 나타났다. 또한 고도처리시설이 도입된 경우에도 오존주입률 증가로 전력비 등이 증가될 수 있으며 이로 인해 정수처리비용이 14~23% 정도 증가하는 것으로 조사되었다. Table 4에서 고려된 비용은 정수처리과정에서 소요되는 수처리제(응집제, 분말활성탄 등)와 고도정수시설 가동 전력비만 고려하였다 (K-water, 2020).

원수에 조류기인 이취미물질이 유입될 경우 처리를 강화하기 위해서는 Table 5와 같이 시설 설치측면에서는 고도처리시설이 요구되며, 운영측면에서는 분말활성탄주입, 염소산화 강화, 고도처리시설 운영 등이 요구된다. 한편, 급속여과방식에서 추가로 주입된 분말활성탄은 모두 침전슬러지를 유발하므로 침전슬러지 처리를 위한 배출수처리시설의 가동시간을 증가시키고 탈수 슬러지 케이크의 발생량을 증가시켜 탈수 슬러지 케이크의 처분비용을 증가시킨다. 고도처리시설을 운영할 경우에는 분말활성탄 주입의 필요성이 거의 없으므로 이와 관련한 비용(분말활성탄 주입, 침전슬러지 추가 발생, 배출수처리시설 추가 가동 등)은 발생하지 않을 수 있다.

Table 3. Cost of operation and maintenance of advanced WTPs (K-water, 2016)

WTP	Process	Quantity of treated water (m ³ /yr.)	Cost (₩/yr.)	Unit cost (₩/m ³)
C	Pre O ₃ +F/A	30,537,729	446,491,940	14.62
D	Post O ₃ +GAC	64,315,686	796,501,020	12.38
E	Post O ₃ +GAC	104,491,214	699,189,423	6.69
F	Post O ₃ +GAC	7,410,600	358,966,131	48.44
G	Pre O ₃ +F/A	26,165,292	448,641,291	17.15

Table 4. Water treatment costs to reduce odor material in Paldang lake (2017-2018)

WTP	Process	Unit cost (₩/m ³)		
		With odor material in raw water	Without odor material in raw water	Increase rate (%)
B	Rapid filtration	6.85	29.41	329.3
D	Post O ₃ +GAC	8.14	9.36	15.0
E	Post O ₃ +GAC, Booster pump station	11.65	13.28	14.0
H	Pre O ₃ +Filter adsorber	8.20	10.06	22.7



Table 5. Estimated expenses for improvement and operation of WTP related to odor material

	Contents	Calculation formula	Cost (10 ³ ₩/yr.)
Installation	- Advanced water treatment processes ¹⁾	- Installation of advanced water treatment processes	70,195,000 ¹⁾
Operation	- Increase of powdered activated carbon (PAC) dose ^{2),*}	- PAC×Period×Capacity×Operation rate×PAC cost 20 g/m ³ ×120 day/yr.×300,000 m ³ /day×0.75×1,228 ₩/1,000 g	663,120
	- Increase of sludge cake due to PAC dose ^{3),*}	- Increase of sludge cake×Period×Capacity×Operation rate×Unit cost 0.1×120 day/yr.×300,000 m ³ /day×0.75×3.12 ₩/m ³	8,427
	- Increase of power usage at dewatering facilities ^{4),*}	- Portion of power usage in dewatering facilities×Increase of power usage×Period×Capacity×Operation rate×Unit cost 0.0092×0.1×120 day/yr.×300,000 m ³ /day×0.75×81.05 ₩/m ³	2,013
	- Increase of chlorination ⁵⁾	- Chlorine dose×Period×Capacity×Operation rate× Chlorine cost 2 g/m ³ ×120 day/yr.×300,000 m ³ /day×0.75×546 ₩/1,000 g	29,484
	- Operation costs of advanced water treatment processes ⁶⁾ (Sum)	- Operation costs of advanced water treatment processes (MOE, 2016)	2,228,000 (2,931,084)

Assumed conditions

- 1) Addition of advanced water treatment processes to the existing rapid filtration system. Costs was calculated base on the guideline of MOE (2016b). (unit : 10³ ₩/yr.)
 - 2) 20 mg/L (10~30 mg/L) of average PAC dose for 4 months
 - 3) 10% increase of dewatered sludge cake for 4 months
 - 4) 10% increase of power usage at dewatering facilities for 4 months
 - 5) 2.0 mg/L increase of chlorination for 4 months
 - 6) Costs was calculated base on the guideline of MOE (2016b).
- * Non-occurrence of costs for PAC addition under advanced water treatment processes operation

3.2.2 여과지 막힘 관련

조류기인 맛냄새 물질은 주로 남조류에서 발생하나 조류막힘 현상은 주로 규조류에 의해 발생하는 현상이다. 대표적인 여과지 폐색조류는 *Cyclotella*, *Mellosira*, *Aulacoseira*, *Asterionella*, *Fragillaria*, *Nitzschia* 및 *Synedra*가 있으며, 특히 *Synedra*에 의한 여과지 폐색 현상이 가장 큰 문제가 된다. 시네드라는 폭이 약 5~6 μm, 길이는 약 90~300 μm 정도로서 기다란 선 모양, 바늘 모양 등을 나타낸다. 시네드라는 호소에 주로 봄과 가을에 출현하며 정수처리시 여과지 폐색과 이취미 발생 등의 피해를 초래할 수 있다 (MOE, 2017b).

급속여과지의 단일여재로는 유효경 0.45~0.7 mm의 모래가 주로 사용되며 이중여재의 경우에는 주로 유효경 0.7~1.5 mm의 안트라사이트+모래가 사용된다. 정수장 설계시 상수원수에서 조류의 개체수가 적을 것으로 예상되는 경우에는 단일여재를 적용하고 조류

의 개체수가 일정 수준 이상으로 예상될 경우에는 여재의 공극이 상대적으로 큰 이중여재를 적용하게 된다. 여재구성에 따라 다르지만 일반적으로 여재의 공극은 100 μm 내외인데 이보다 큰 입자물질이 유입될 경우에는 여재 표면에서 제거되어 여층 하부에 유입된 입자물질 제거공간이 있음에도 불구하고 급격하게 여재가 막힘에 따라 여과지속시간이 감소하게 되고 빈번한 역세척을 유발하게 된다 (MOE, 2017a).

일반적으로 급속여과공정에서 단일여재는 여과속도 120~150 m/d에서 여과지속시간이 48시간 내외이며, 이중여재는 여과속도 120~240 m/d에서 72시간 내외이다. Fig. 1은 A정수장에서 2016.5.13~25일 유입수의 조류 개체수와 여과지속시간의 상관관계를 나타내고 있다. 5월 18일 여과지속시간은 65시간이었으나, 유입수의 시네드라 개체수가 546 cells/mL를 기록한 5월 20일에는 29시간이 감소되어 여과지속시간이 55% 감소되었다 (K-water, 2020).

pp. 239-250

pp. 251-258

pp. 259-266

pp. 267-276

pp. 277-288

pp. 289-301

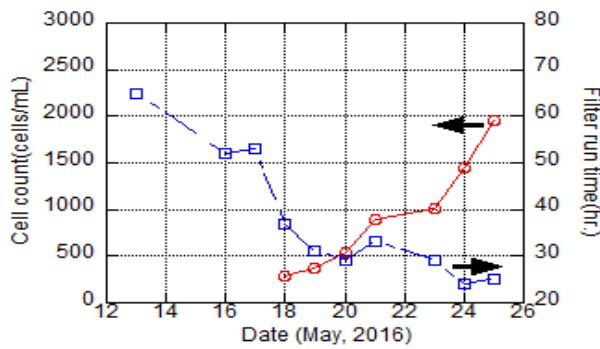


Fig. 1. Relationship between algae cell counts in raw water and filter run time at A WTP (May, 2016).

여과지속시간과 역세척 횟수간에는 반비례 관계가 있으므로 여과지속시간이 짧아질수록 역세척 횟수는 증가하게 된다. 역세척 횟수가 증가할수록 역세척에 소요되는 전력비가 증가하고 조류 농도가 높을 경우 역세척수를 회수하지 않고 배출수처리시설을 통해 처리후

방류한다. 역세척수로는 정수 또는 여과수가 사용됨에 따라 역세척수를 회수하지 않고 방류할 경우에는 막대한 수자원의 손실이 발생할 수 있다.

여과지폐색을 유발하는 규조류에 대한 처리방안으로서 전염소 주입에 따른 제거율은 큰 차이가 없으며, 폴리아민 주입에 의해 시네드라 제거율이 80% 이상 확보 가능한 것으로 보고되기도 하였다. 상수원수에서 시네드라 발생 특성과 여과지 형태에 따라 차이가 발생할 수는 있으나, 시네드라에 의해 여과지 폐색에 효과적으로 대응하기 위해서는 전염소 1.0 mg/L 주입, 응집/여과보조제로 폴리아민 3.0 mg/L 정도의 주입이 권장되며 정확한 주입률은 현장에서 jar-test, 제타전위측정 등을 통해 결정되어야 한다 (MOE, 2017b).

규조류에 의한 여과지 폐색이 발생할 경우 이에 대한 대응 강화를 위해서는 Table 6과 같이 시설 설치측면에서는 단일여재 여과지를 이중여재 여과지로 개량

Table 6. Estimated expenses for improvement and operation of WTP related to filter clogging

	Contents	Calculation formula	Cost (10 ³ ₩/yr.)
Installation	- Change of mono media to dual media filter system ¹⁾	- Number of filters×Unit cost 100,000,000 ₩/ea.×20 ea.	2,000,000 ¹⁾
Operation	- Addition of polyamine for filtration aid ²⁾	- Polyamine dose×Period×capacity×Operation rate×Coagulant cost 3 g/m ³ ×120 day/yr.×300,000 m ³ /day×0.75×2,952 ₩/1,000 g	239,112
	- Increase of power usage due to frequent backwashing ³⁾	- Portion of power usage in filters×Increase of power usage×Period×Capacity×Operation rate×Unit cost 0.0013×6×120 day/yr.×300,000 m ³ /day×0.75×81.05 ₩/m ³	17,059
	- 50% discharge of backwashing water due to high algae cell counts ⁴⁾	- Quantity increase of backwashing water×Period×Capacity×Operation rate×Discharge rate×Cost of treated water 0.15×120 day/yr.×300,000 m ³ /day×0.75×0.5×432.8 ₩/m ³	876,420
	- Increase of power usage at dewatering facilities ⁵⁾	- Portion of power usage in dewatering facilities×Increase of power usage×Period×Capacity×Operation rate×Unit cost 0.0092×0.1×120 day/yr.×300,000 m ³ /day×0.75×81.05 ₩/m ³	2,013
	- Increase of chlorination ⁶⁾	- Chlorine dose×Period×Capacity×Operation rate×Chlorine cost 1 g/m ³ ×120 day/yr.×300,000 m ³ /day×0.75×546 ₩/1,000 g	14,742
	(sum)		

Assumed conditions

- 1) change of mono media to dual media filter system (20 filter basins) (unit : 103 Vyr.)
- 2) 3 mg/L addition of polyamine for 4 months
- 3) 75% decrease of filtration duration time, 600% increase of backwashing frequency
- 4) 15%p increase of backwashing water ratio (quantity of backwashing water/quantity of raw water) for 4 months and 50% discharge of backwashing water due to high algae cell counts
- 5) 10% increase of power usage at dewatering facilities for 4 months
- 6) 1.0 mg/L increase of pre-chlorination at intake station for 4 months



하고, 운영측면에서는 여과지속시간 증대를 위해 응집/여과보조제인 폴리아민 주입, 염소산화 강화 등이 요구된다. 한편 여과지속시간의 감소로 역세척 물량이 증가함에 따라 역세척에 소요되는 동력비가 증가하고 역세척수로 사용되는 정수 또는 여과수가 배출수처리시설을 통해 공공수역으로 방류됨으로써 귀중한 수자원의 손실이 발생할 수 있다. 또한, 역세척 배출수처리를 위한 배출수처리시설의 가동시간이 증가될 수 있다.

3.2.3 원수 pH 상승 관련

조류는 광합성을 하는 생산자로서 수중의 이산화탄소를 소비하고 산소를 생산한다. 이 과정에서 수중의 탄산을 소비하여 원수의 pH가 상승하게 된다. 원수의 pH가 8.0 이상으로 상승할 경우 동일 응집제 주입률에서 응집효율이 저하되어 무기물, 유기물의 제거율이 전반적으로 저하하게 된다.

이에 따라 정수 탁도, 염소요구량, 염소소독부산물의 농도가 모두 상승하게 된다. 따라서 효율적인 정수처리를 위해서는 원수의 pH를 적정 수준으로 유지하기 위해 산제를 사용하게 되는데 환경부에서 고시한 수처리재의 기준과 규격 및 표시기준에 의하면 황산 및 이산화탄소 주입이 가능하다 (MOE, 2017c).

최근 수도시설에서는 취급의 용이성 및 안전성 등을 고려하여 원수의 pH 저감을 위해 이산화탄소 주입설비를 설치하여 운영하고 있다. 따라서 조류로 인해 원수의 pH가 상승할 경우 이산화탄소 주입설비의 신규 설치 및 이산화탄소 주입설비의 운영 등이 요구된다.

Fig. 2는 팔당호에서 취수하는 수도권 광역상수도 B정수장과 대청호에서 취수하는 C정수장의 2019년 원수 pH를 나타낸다. B정수장 원수의 pH가 8.0을 초과하는 일수는 모두 68일로 조사되었으나, C정수장 원수의 경우 pH가 8.0을 초과하는 경우는 전혀 발생하지 않았다. B정수장으로 유입되는 상수원수는 호소지표수를 취수하는 관계로 조류에 의한 원수 pH 상승에 직접적으로 영향을 받고 있다. 그러나, 대청호에서 호소수를 취수하는 C정수장의 경우 취수탑에서 수위별 선택취수가 가능하며, 녹조현상 발생시 조류개체수가 상대적으로 적은 심층취수를 실시함으로써 원수의 pH를 8.0 이하로 유지할 수 있다. 이러한 경우에는 정수처리과정에서 원수 pH 조절의 필요성이 상대적으로 줄어든다 (K-water, 2020).

원수에서 조류의 영향으로 원수의 pH가 상승할 경우에는 이에 대한 대응 강화를 위해서는 Table 7과

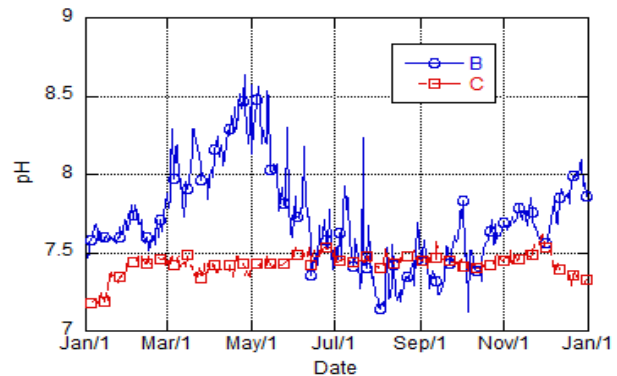


Fig. 2. pH of raw water in Paldang lake (B) and Daechung lake (C) (2019).

Table 7. Estimated expenses for improvement and operation of WTP related to pH increase

	Contents	Calculation formula	Cost (10 ³ ₩/yr.)
Installation	- Carbon dioxide injection facility	- Carbon dioxide injection facility	500,000 ¹⁾
	- Addition of carbon dioxide ²⁾	- Carbon dioxide dose×Period×capacity×Operation rate×Carbon dioxide cost	22,376
Operation	- Increase of coagulant dose ³⁾	- Coagulant dose×Period×Capacity×Operation rate×Coagulant cost	24,604
	(Sum)	5 g/m ³ ×90 day/yr.×300,000 m ³ /day×0.75×221 ₩/1,000 g	(46,980)

Assumed conditions

1) Unit : 10³ ₩/yr.

2) 5 mg/L addition of carbon dioxide for 3 months

3) 5 mg/L (g/m³) increase of coagulant (PACS) dose for 3 months due to decrease of coagulation efficiency

같이 시설 설치측면에서는 원수 pH 저감을 위한 액화탄산 주입설비의 설치가 필요하고, 운영측면에서는 액화탄산의 주입과 원수 pH 상승에 따른 응집제요구량 증가로 응집제 주입률 상승이 예상된다.

3.3 유기물 농도 상승이 정수처리 비용에 미치는 영향

댐상류로부터 고농도의 유기물이 유입되어 호소의 전반적인 유기물 농도가 상승할 수 있으며, 호소 내 조류 등의 농도 증가 및 사멸과정에서 자체적으로 유기물 농도가 상승할 수도 있다. 먹는물 수질기준에서 유기물과 관련된 지표항목은 과망간산칼륨소비량이며 수질기준은 10 mg/L 이하이다 (MOE, 2020). 한편, 일본의 경우는 유기물 지표로서 총유기탄소에 대한

먹는물 수질기준을 3 mg/L 이하로 설정하여 운영하고 있으며, 일본 동경도의 TOC 수질목표는 1 mg/L 이하이다.

유기물 농도가 상승할 경우에는 정수처리공정에서 염소요구량 증가로 인한 염소주입률 증가, 소독부산물 전구물질 농도 증가에 따른 염소소독부산물 농도 증가가 예상된다. 유기물과 염소가 반응하여 생성되는 대표적인 염소소독부산물로는 트리할로메탄 (THMs), 할로아세트에시드 (HAAs) 등이 있으며 일부 염소소독부산물의 경우 발암의심물질로 분류된다. 따라서 소독부산물 농도 저감을 위한 유기물 농도 저감을 위해 급속여과시설에서는 분말활성탄 주입률 증가, 고도처리시설에서는 오존주입률 증가 및 입상활성탄 사용기

Table 8. Estimated expenses for improvement and operation of WTP related to organic material

	Contents	Calculation formula	Cost (10 ³ W/yr.)
Installation	- Advanced water treatment processes ¹⁾	- Installation of advanced water treatment processes	70,195,000 ¹⁾
	- Re-chlorination system ²⁾	- Re-chlorination (using sodium hypochlorite) station, 2 ea.	500,000 ²⁾
Operation	- Increase of powdered activated carbon (PAC) dose ^{3),*}	- PAC×Period×Capacity×Operation rate×PAC cost 10 g/m ³ ×120 day/yr.×300,000 m ³ /day×0.75×1,228 W/1,000 g	331,560
	- Increase of sludge cake due to PAC dose ^{4),*}	- PAC×Period×Capacity×Operation rate×PAC cost 0.05×1120 day/yr.×300,000 m ³ /day×0.75×3.12 W/m ³	4,214
	- Increase of power usage at dewatering facilities ^{5),*}	- Portion of power usage in dewatering facilities×Increase of power usage×Period×Capacity×Operation rate×Unit cost 0.0092×0.05×120 day/yr.×300,000 m ³ /day×0.75×81.05 W/m ³	1,007
	- Increase of post-chlorination ^{6),*}	- Chlorine dose×Period×Capacity×Operation rate×Chlorine cost 1 g/m ³ ×120 day/yr.×300,000 m ³ /day×0.75×546 W/1,000 g	14,742
	- Re-chlorination ^{7),*}	- Sodium hypochlorite (as chlorine) dose×Period×Ea.×Capacity×Operation rate×Sodium hypochlorite cost 1 g/m ³ ×120 day/yr.×2×50,000 m ³ /day×0.75×1,500 W/1,000 g	13,500
	- Operation costs of advanced water treatment processes ⁸⁾	- Operation costs of advanced water treatment processes (MOE, 2016)	2,228,000
	(Sum)		(2,593,023)

Assumed conditions

- 1) Addition of advanced water treatment processes to the existing rapid filtration system. Costs was calculated base on the guideline of MOE (2016b). (unit : 10³ W/yr.)
- 2) Installation of 2 re-chlorination system (Q = 50,000 m³/day · ea.) (unit : 10³ W/yr.)
- 3) 10 mg/L of average PAC dose for 4 months
- 4) 5% increase of dewatered sludge cake for 4 months
- 5) 5% increase of power usage at dewatering facilities for 4 months
- 6) 1.0 mg/L increase of chlorination for 4 months
- 7) 1.0 mg/L (as chlorine) addition of sodium hypochlorite for 4 months
- 8) Costs was calculated base on the guideline of MOE (2016b).

* Non-occurrence of costs for PAC addition under advanced water treatment processes operation



간 단축 등이 예상된다. 또한, 정수처리후에도 유기물 농도가 높을 경우에는 수돗물 공급과정에서 잔류염소 소모율이 증가하여 재염소 주입시설의 설치 및 운영이 필요할 수 있다 (Kim and Han, 2014).

상수원에서 유기물 유입 농도 증가로 인해 발생할 수 있는 소독부산물의 농도를 저감하기 위해서는 원수에 존재하는 유기물의 제거가 필요하다. 정수처리 공정에서 유기물 농도를 저감하기 위해서는 강화응집 (enhanced coagulation), 분말활성탄 또는 입상활성탄 흡착, 오존산화 등을 고려할 수 있다.

원수에서 유기물 농도가 상승할 경우 이에 대한 대응 강화를 위해서는 Table 8과 같이 시설 설치측면에서는 고도처리시설 및 재염소 주입시설의 설치가 요구된다. 운영측면에서는 분말활성탄주입, 염소산화 강화, 고도처리시설 운영강화, 재염소 주입시설 운영 강화 등이 요구된다. 추가로 주입된 분말활성탄은 모두 침전슬러지를 유발하여 침전슬러지 처리를 위한 배출수처리시설의 가동시간을 증가시키고 탈수 슬러지 케이크의 발생량을 증가시켜 탈수 슬러지 케이크의 처분비용을 증가시킬 수 있다. 한편, 고도처리시설의 경우 이취미 및 유기물 제거에 모두 적용될 수 있으므로 중복 고려는 불필요하다.

4. 결 론

본 논문에서는 국내 상수원의 가장 큰 비중을 차지하는 호소수를 취수하는 급속여과시설을 대상으로 상수원수 수질과 관련한 5가지(탁도, 조류기인 이취미 물질, 조류기인 여과지 막힘, 조류기인 pH, 유기물 농도) 항목에 대해 국내 상수원에서 과거 자료를 바탕으로 발생가능한 최악의 조건을 가정하고 해당 조건에서 예상되는 정수시설 개선비 또는 운영비를 산정하였다.

원수 수질저하에 대응하여 정수처리시설 설치측면에서는 선택취수시설, 이중여과시설, 액화탄산 주입시설, 고도처리시설, 재염소 주입시설 등의 선택적인 추가 설치가 필요할 것으로 판단되며, 정수처리시설 운영측면에서는 분말활성탄 주입, 응집제 주입량 증가, 염소소독제 주입량 증가, 응집/여과보조제 주입, 역세척 물량 증가, 배출수처리시설 가동시간 증가 등이 예상된다. 따라서 고품질의 수돗물을 안정적으로 생산

하고 정수처리 비용의 절감을 위해서는 지속적인 상수원수의 수질개선이 필요할 것으로 판단된다.

한편, 본 논문에서 고찰한 상수원수 수질저하의 5가지 항목은 발생시기가 일부 중첩되거나 특정 수질 항목의 발현이 다른 항목의 발현을 억제할 수 있으므로 이에 대한 고려가 필요하다. 예를 들어 탁도의 장기간 상승은 조류의 광합성을 억제하여 녹조발생 현상을 억제할 수 있으므로 해당시기에는 조류에 의한 이취미, 여과지폐색, 원수 pH 상승 등이 발생하지 않을 가능성이 높다. 따라서 특정 수도시설을 대상으로 원수 수질저하가 정수처리비용에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 현장별 특성에 대한 고려가 필요하다.

사 사

이 논문은 2020학년도 제주대학교 교원성과지원사업에 의하여 연구되었음. 본 연구는 환경부 “글로벌 탐 환경기술개발사업(2016002120006)”으로 지원받았습니다.

References

- Kim, J.K. (2007) Current status and countermeasure of turbid water occurrence in Imha Dam, Water Journal (38)
- Kim, J.K. and Han, J.A. (2014). Rechlorination for residual chlorine concentration equalization in distribution system, J. Korean Soc. Water Wastewater, 208(1), 91-101.
- K-water. (2019). 2018 Annual report of waterworks management.
- K-water. (2020). Internal data.
- Ministry of Environment (MOE). (2016a). Manual for installation, management and operation of non-point pollution reduction facilities.
- MOE. (2016b). Criteria for rough estimation of water facility operation and construction costs, 8-11.
- MOE. (2017a). Waterworks design criteria.
- MOE. (2017b). Preparing measures to strengthen the use of chemicals and by-products in the water treatment plant in connection with the water quality of raw water, 29-120.
- MOE. (2017c). Standards, specifications, and presentation

- criteria for water treatment chemicals.
- MOE. (2019a). 2017 waterworks statistics.
- MOE. (2019b). 2019 white paper of environment, 135-141.
- MOE. (2020). Regulations on drinking water quality standards and inspection.
- Yum, K.T., Park, E.S., Song, S.J. and Lee, G.S. (2007). Consideration on the status and improvement factors of the turbid-water management in multi-purpose dam, J. Korean Soc. Civ. Eng., 55(12), 123-131.