



고도정수처리에 따른 상수도 공급과정에서의 소독부산물 농도 예측모델 개발

Development of a Concentration Prediction Model for Disinfection By-product according to Introduce the Advanced Water Treatment Process in Water Supply Network

서지원¹·김기범¹·김기범²·구자용^{1*}
Jeewon Seo¹·Kibum Kim¹·Kibum Kim²·Jayong Koo^{1*}

¹서울시립대학교 환경공학과, ²서울시립대학교 도시과학대학원 환경공학과

¹Department of Environmental Engineering, University of Seoul

²Department of Environmental Engineering, Graduate School of Urban Science, University of Seoul

ABSTRACT

In this study, a model was developed to predict for Disinfection By-Products (DBPs) generated in water supply networks and consumer premises, before and after the introduction of advanced water purification facilities. Based on two-way ANOVA, which was carried out to statistically verify the water quality difference in the water supply network according to introduce the advanced water treatment process. The water quality before and after advanced water purification was shown to have a statistically significant difference. A multiple regression model was developed to predict the concentration of DBPs in consumer premises before and after the introduction of advanced water purification facilities. The prediction model developed for the concentration of DBPs accurately simulated the actual measurements, as its coefficients of correlation with the actual measurements were all 0.88 or higher. In addition, the prediction for the period not used in the model development to verify the developed model also showed coefficients of correlation with the actual measurements of 0.96 or higher. As the prediction model developed in this study has an advantage in that the variables that compose the model are relatively simple when compared with those of models developed in previous studies, it is considered highly usable for further study and field application. The methodology proposed in this study and the study findings can be used to meet the level of consumer requirement related to DBPs and to analyze and set the service level when establishing a master plan for development of water supply, and a water supply facility asset management plan.

Key words: Advanced water treatment, Disinfection by-product(DBPs), Prediction model for DBPs concentration, Water supply network

주제어: 고도정수처리, 소독부산물 농도 예측, 소독부산물, 상수도관망

1. 서 론

취수 후 정수처리과정을 거친 수돗물은 상수도관을

통해 일반가정으로 공급된다. 우리나라는 공급과정에서 2차 수질오염을 예방하기 위하여 공급과정에서 잔류성이 있는 염소를 이용하여 수돗물을 소독하고 있다. 그러나 수중에 존재하는 천연유기물질(NOM, Natural organic matters)은 송·배수관에서 소독부산물

Received 11 August 2017, revised 4 September 2017, accepted 8 September 2017

* Corresponding author: Jayong Koo (E-mail: jykoo@uos.ac.kr)

pp. 373-381
pp. 383-388
pp. 389-395
pp. 397-407
pp. 409-414
pp. 415-419
pp. 421-430
pp. 431-440
pp. 441-445
pp. 447-457
pp. 459-469

Table 1. THMs formation models

Model	Ref.
$\frac{d(TTHM)}{dt} = K_n \times Cl_2 \times C^m$ <p>m : Constant, K_n : Reaction rate constant, C : Concentration of organic matters</p>	[Eq. 1] Trusell and Umphres 1978
$TTHM = k(pH - a)(TOC)(Cl_2)o^m(t)^a$ <p>TTHM : Concentration of total THM(ug/L), (Cl_2)o^m : Initial concentration of chlorine(mg/L), t : Retention time(hour), k, a, m, n : Constant</p>	[Eq. 2] Urano et al.. 1983
$TTHM = 23.9(TOC \cdot UV_A)^{0.403}(Cl_2)^{0.225}(Br)^{0.141}(1.027)^{(t-20)}(1.156)^{(pH-7.5)}t^{0.264}$ <p>TTHMs : TTHM (ug/L) : $13 \leq TTHM \leq 690$ TOC : TOC (mg/L) : $1.00 \leq TOC \leq 7.77$ UV_A : UV_A (1/cm) : $0016 \leq UV_A \leq 0.215$ Cl_2 : Concentration of chlorine (mg/L) : $1.11 \leq Cl_2 \leq 24.75$ Br : Br (ug/L) : $23 \leq Br \leq 308$ T : Temp (°C) (T = 20 °C) pH : pH(= 7.5) t : Time (h) : $2 \leq t \leq 168$</p>	[Eq. 3] Amy et al.. 1998
$\frac{d[THM]}{dt} = k(Cl_2)(THMFP)$ $\frac{1}{[Cl_2]_i - [THMFP]_T} \times \ln\left(\frac{[THMFP]_T \times [Cl_2]}{[Cl_2]_i([THMFP]_T - [THM])}\right) = kt$ <p>k = THMs reaction rate constant, $[Cl_2]_i$: Concentration of chlorine $[THMFP]_i$: Initial THMFP, $[THMFP]_T$: Final THMFP (t = t_i, $[THM] = [THMFP]_i$) $[THMFP]_T = [THMFP]_i - [THMFP]_i$</p>	[Eq. 4] Gallard, and Gunten, 2002
$THMs = 2.55 \cdot 10^{0.0035(Temp)} Cl_0^{0.6398} t^{0.6184} SUVA^{0.6126} + THM_i$ <p>Cl_0 : Initial concentration of chlorine, t : time, SUVA : Organic matters</p>	[Eq. 5] Han, 2003

(DBPs, (Chlorine) Disinfection By-products) 생성의 전구물질로 작용한다. 대표적인 DBPs 중의 하나인 트리할로메탄(THMs, Trihalomethanes)은 발암물질로 알려져 있으며, USEPA에서는 이와 같은 물질을 Group B2로 분류하여 독성물질로써 취급하고 있다 (Westerhoff et al., 2005). 이와 같은 문제로 수도사업자는 정수처리과정 중 소독공정에서의 염소투입량을 낮추거나 수중에 존재하는 DBPs 전구물질의 농도를 제어할 필요성이 있다.

기존 표준정수처리공정을 사용하는 경우에는 DBPs의 전구물질인 NOM 제거가 어려워 DBPs 생성량을 줄이지 못한다는 한계점이 존재한다 (Gang et al., 2002). 이에 대한 해결 방안 중 하나로 최근 고도정수처리시설이 도입되고 있다. 고도정수처리로서 대표적으로 활용되고 있는 오존+입상활성탄(GAC, Granular Activated Carbon) 공정은 원수에 존재하는 NOM, 지오스민(Geosmin), 2-MIB 등을 제거할 수 있는 것으로 알려져 있다 (Langlais et al., 1991).

표준정수처리 후단에 오존+GAC공정을 추가해 유

기물지표인 UV254 및 DOC제거율이 높아지고 잔류염소 감소계수가 낮아지며 THMs 생성을 억제하는 능력이 우수하게 나타난다는 연구결과가 보고된 바 있다 (Lee et al., 2007). 또한 분말활성탄(PAC, Powdered Activated Carbon)+막여과+F/A(Filter/Adsorber)가 결합된 고도정수처리를 통해 NOM의 저감이 가능한지 여부를 평가한 연구도 있다 (Kim et al., 2015). 이와 같이 DBPs 예측과 관련된 선행 연구들은 주로 정수처리공정 내에서의 DBPs 전구물질 저감과 관련된 연구라 할 수 있다 (Lee et al., 2015; Son et al., 2005). 그러나 DBPs는 상수도관망 내를 체류하는 시간동안 증가하는 물질이므로, 갈수록 증가하는 소비자의 수도물 서비스 요구사항에 적절하게 대응하기 위해서 수도사업자가 어떤 업무를 실시해야하는지를 파악하고 있지 못한 실정이다.

선행 연구의 결과들은 표준정수처리공정과 고도정수처리공정에서의 NOM 제거 능력에 차이가 있음을 보여주고 있으며, 이를 고려할 때 고도정수처리시설 도입 여부에 따라 DBPs의 생성 경향도 달라질 것으로 판단된다.



DBPs 생성에 영향을 미치는 수질인자로는 잔류염소 농도, 전구물질농도, 접촉시간, pH, 수온, 브롬 등이 있다 (Stevens et al., 1976; Trussell and Umphres, 1978; Urano et al., 1983; Symons et al., 1993; Singer, 1994; Owen et al., 1993). 다음 Table 1은 DBPs 중 THMs의 생성을 예측하기 위해 개발된 모델들을 나타낸다.

DBPs 예측과 관련된 선행 연구들은 주로 단기간의 pilot 실험을 통해 도출된 결과들을 제시하고 있다. 즉, 정수장 및 공급지역에 대한 장기적인 수질모니터링을 통해 DBPs를 예측한 연구사례는 제한적이라 할 수 있다.

본 연구에서는 S시 정수장중 가장 먼저 고도정수처리가 도입된 Y정수장의 고도정수처리시설 도입 전·후 배수관망 및 수용가에서 발생하는 DBPs 예측모델을 개발하고 개발한 모델을 현장에 적용함으로써, 고도정수처리시설 도입 전·후 수용가의 DBPs 농도를 예측할 수 있는 방법론을 개발하고자 하였다. 이를 통해 DBPs와 관련된 소비자의 요구 수준에 대응하고, 수도정비기본계획 수립, 상수도관망 재정비 계획 수립, 상수도시설 자산관리계획 수립시 서비스수준 분석 및 설정 등에 활용할 수 있는 표준화된 모델을 제안하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 연구대상지역

연구대상지역은 최근 고도정수처리공정이 추가된 S시에 위치한 Y정수장을 선정하였다. Y정수장은 2011년에 기존의 착수정, 혼화지, 응집침전지, 여과지로 구성된 표준정수처리시설 후단에 오존접촉지와 잔류오존 제거조, 활성탄흡착지로 구성된 고도정수처리시설을 추가하였다.

다음 Fig. 1은 Y정수장의 공급지역을 나타낸다. Y정수장 중 1정수장의 시설규모는 일 30만 m³이며, SJ배수지(시설용량 50,000 m³), SW배수지(시설용량 40,000 m³)를 거쳐 YC구와 KS구에 수도를 공급하고 있다. 2정수장의 시설규모도 일 30만 m³이며, MD배수지(시설용량 60,000 m³), WJS배수지(시설용량 30,000 m³)를 거쳐 KC구, KR구, KS구에 수도물을 공급하고 있다. 본 연구에서는 Y정수장의 수질 측정 자료를 바탕으로 개발한 모델을 SJ배수구역에 적용하고자 하였다.

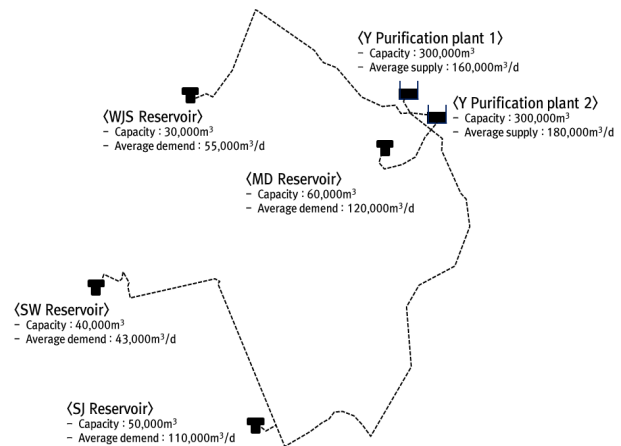


Fig. 1. Supply area of Y water purification plant.

2.2 수질 조사결과 수집 및 현장 수질 측정

본 연구에서는 Y정수장의 정수처리수와 Y정수장에서 생산된 수도물을 공급받고 있는 모든 배수구역의 수도꼭지 수도물에 대한 수질 측정 결과를 대상으로 데이터 구축을 실시하였다. 여기서 수도꼭지 수도물의 경우 급수방식에 따라 직결식과 저수조방식으로 구분된다. 수질항목으로는 먹는물 수질기준 항목 중 온도, pH, 잔류염소, KMnO₄ 소비량, THMs, HANs, HAAs를 지정하였으며, Table 2는 연구대상의 수질모니터링 기간 및 범위를 나타낸다.

수질모니터링자료는 2단계로 구분하여 조사하였다. 먼저, 2006년 9월부터 2010년 6월까지, 2011년 6월부터 2011년 12월까지의 기간(총 19회)에 대해서는 S시 상수도 사업본부 홈페이지의 수도물평가위원회의 Y정수장 분기별(3월, 6월, 9월, 12월) 수질검사 성적서를 조사하여 수질모니터링 자료를 확보하였다. 고도정수처리시설이 도입된 이후의 수질검사자료(2010년 9월부터 2016년 3월까지(총 23회))는 현장 및 실험실 실험을 통해 확보하였다. 현장 및 실험실 시험에는 먹는물 공정시험기준에 따라 항목별로 시료채취하고 전처리 및 기기분석을 하였으며, 시료의 채취 및 보존, 정도보증/정도관리(QA/QC)는 MOE (2015)에 제시된 기준을 따랐다.

여기서, 2015년 3월까지의 수질검사결과는 DBPs 예측 모델 개발에 활용하였으며, 2015년 6월부터 2016년 3월까지의 수질검사 결과는 모델식의 검증에 활용하였다.

pp. 373-381
pp. 383-388
pp. 389-395
pp. 397-407
pp. 409-414
pp. 415-419
pp. 421-430
pp. 431-440
pp. 441-445
pp. 447-457
pp. 459-469

Table 2. Water quality monitoring period

Year	Monitoring period										
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Standard water treatment	‘06.09~’11.12 Training										
Advanced water treatment (O ₃ +GAC)	‘10.09~’15.03 Training ‘15.05~’16.03 Verification										
Monitoring interval	Quarterly (March, June, September, December)										
Monitoring spot	The lowest step of Y purification plant, tap water(using direct supply method), tap water(using retention tank)										
Monitoring items	Temperature, pH, Residual chlorine, Comsumpsion of KMnO ₄ , DPBs(THMs, HANs, HAAs)										

Table 3. Retention time in supply network

Reservoir	Retention time of transmission (Y purification plant ~ reservoir)(hr)	Demand of supply area (m ³ /d)	Average retention time in reservoir(hr)
SJ	4.63	110,000	10.90

2.3 공급지역 관망 체류시간 도출

앞서 기술한 바와 같이 선행연구의 결과는 DBPs의 생성을 관망 내 체류시간의 함수로써 표현할 수 있다는 것을 보고하고 있다. 본 연구에서는 DBPs 생성 영향인자 중 하나로써 관망 내 체류시간을 활용하기 위하여 Y정수장의 정수지로부터 배수지를 지나 임의의 채수지까지 도달하는 체류시간(Water age)을 구하기 위하여 관망수리해석을 실시하였다. 상수도관망 내 체류시간은 Rossman이 개발하여 상용화된 관망 수리 해석 프로그램인 EPAnet 2.0을 이용하여 도출하였다. 관망도는 USEPA에서 개발하여 상용화된 EPAnet 2.0을 기본으로, S시의 지리정보시스템(GIS, Geographic Information System)과 연계된 상수관로 CAD도면을 활용하여 작성하였다.

관망 내 체류시간은 정수장부터 연구대상지역 SJ배수지까지 송수과정에서 소요되는 시간, SJ배수지 내 체류시간, SJ배수지부터 수도꼭지까지 배수과정에서 소요되는 시간, 급수과정에서 소요되는 시간의 합으로 산정하였다. 송수과정에 소요되는 시간과 SJ배수지내 체류시간은 Table 3.과 같다. 배수과정에서 소요되는 시간은 SJ배수구역의 수리해석 결과를 이용하였

다. 한편, 급수과정에서 소요되는 시간은 직결식 급수 방식과 저수조식 급수방식을 달리 적용하였다. 직결식 급수방식은 인입급수관으로 유입된 수도가 체류시간 없이 바로 수도꼭지로 유출된다고 가정하여, 체류시간으로써 0 h를 적용하였다. 반면, 저수조식 급수방식은 저수조의 제원과 해당 수용가의 일평균 물사용량을 파악할 수 있는 경우에는 저수조 내 평균 체류시간을 산정하여 적용하였으나, 저수조의 제원을 파악하기 어려운 경우 일괄적으로 8 h의 저수조 체류시간을 갖는다고 가정하였다.

2.4 소독부산물 예측 모델 개발

DBPs 예측 모델 개발에 앞서 고도정수처리 전·후 수도꼭지의 수질모니터링을 통해 고도정수처리시설 도입 전·후의 수질차이를 확인하기 위한 비교분석을 수행하였다. 한편 수용가의 급수형태에 따라 수질에 차이가 발생할 수 있음을 고려하여, 4개의 집단(표준정수처리-직결식 급수방식, 표준정수처리-저수조식 급수방식, 고도정수처리-직결식 급수방식, 고도정수처리-저수조식 급수방식)에 따라 구분한 수질 측정 결과상에 유의미한 차이가 있는지를 파악하기 위하여, 이월



분산분석(two-way ANOVA)을 수행하였다. 분산분석은 상용화된 통계분석 소프트웨어인 SPSS 24.0을 이용하여 실시하였으며, 분산분석 수행 결과는 집단간 차이를 파악하기 위한 F 검정량과 검정량에 대한 유의확률을 활용하여 분석하였다. 각 경우에 대한 분산분석 수행 결과는 표로 정리하여 나타내었다.

고도처리도입 전·후를 구분한 뒤 정수장 유출수의 수질 특성(수온, pH, KMnO₄ 소비량, 잔류염소 농도, DBPs(THMs, HANs, HAAs))과 수용가의 수질 특성(수온, pH, KMnO₄ 소비량, 잔류염소 농도, DBPs(THMs, HANs, HAAs)) 및 관망 내 체류시간을 이용하여 수용가 DBPs 농도에 대한 상관분석을 실시하였다. 상관분석은 SPSS 24.0을 이용하여 수행하였으며, 상관분석의 결과를 고려하여 수용가의 DBPs 농도에 영향을 주는 것으로 판단되는 요인을 도출하였다.

DBPs 예측모델은 상관분석을 통해 도출된 DBPs 생성 영향요인을 독립변수로 설정하고, 수용가 DBPs의 농도를 종속변수로 설정한 중회귀분석을 통해 개발하였다. 중회귀분석은 SPSS 24.0을 이용하여 수행하였으며, 중회귀모형을 만드는 과정은 독립변수를 단계별로 하나씩 포함시키며 통계적 유의성을 검증한 뒤, 통계적 유의성이 확보되는 독립변수는 포함시키고, 통계적 유의성이 확보되지 못한 독립변수를 제거하는 방법인 전진선택법을 활용하였다. 도출된 최종 중회귀모형에 대해서는 유의성 검정(분산분석)을 실시하여 모형 자체의 유의성여부는 파악하였다. 또한 최종 중회귀모형에 포함된 회귀계수에 대한 유의성 검정을 실시하였으며, 마지막으로 최종 중회귀모형에 포함된 독립변수에 대한 공선성 검정을 통해 개발한 예측모델의 적합성을 나타내었다.

2.5 소독부산물 예측 모델의 검증 및 적용

개발한 모델의 검증에는 모델 개발에 활용하지 않은 2015년 6월 이후(4회)의 수질 측정 자료를 활용하였다. 대상지역에 공급하는 수돗물은 이미 고도정수처리를 거친 수돗물이기 때문에, 고도정수처리를 대상으로 개발한 DBPs 농도예측 모델에 대한 검증을 수행하고자 하였으며, 실측값과 예측값 사이의 상관관계 수 및 오차에 대한 분석을 토대로 개발한 모델이 실측값을 잘 모사하는지 여부를 판단하였다.

검증이 완료된 예측 모델은 연구대상지역에 적용하

여 연구대상지역 전체 수용가에 대해 DBPs를 예측하는데 활용하였다.

3. 연구 결과

3.1 고도정수처리시설 도입 전·후의 수질 차이 분석 결과

고도정수처리시설 도입 후 정수장유출수에서 잔류염소와 KMnO₄ 소비량의 농도는 Fig. 2와 Fig. 3에 나타난 바와 같이 표준정수처리공정을 운영하던 시기에 대비하여 낮아진 것을 확인하였다. 이는 오존+GAC공정으로 인한 유기물 제거율이 증가하였기 때문이라 판단되며, 이에 따라 소독제 주입량 역시 기존과 같이 유지할 필요성이 떨어졌기 때문이라 판단된다. 수용가에서도 마찬가지로 정수장에서의 염소주입농도가

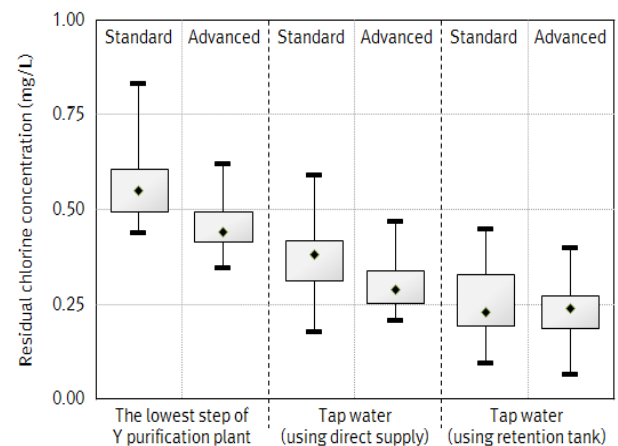


Fig. 2. Comparison of residual chlorine concentration.

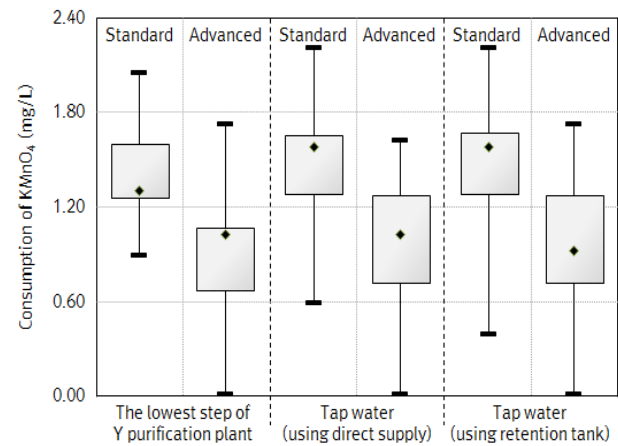


Fig. 3. Comparison of consumption of KMnO₄.

pp. 373-381

pp. 383-388

pp. 389-395

pp. 397-407

pp. 409-414

pp. 415-419

pp. 421-430

pp. 431-440

pp. 441-445

pp. 447-457

pp. 459-469

Table 4. Comparison of disinfection by-product concentration

Monitoring spot		Average concentration (Standard deviation)			
		THMs (mg/L)	HANs (mg/L)	HAAs (mg/L)	Sum (mg/L)
Standard treatment ('06.09~'11.12)	The lowest step of Y purification plant	0.014 (0.00486)	0.00271 (0.00102)	0.0067 (0.00284)	0.02341
	tap water(using direct supply method)	0.021 (0.00736)	0.00493 (0.00201)	0.0109 (0.00440)	0.03683
	tap water(using retention tank)	0.026 (0.00812)	0.00621 (0.00241)	0.0127 (0.00510)	0.04491
Advanced treatment ('10.09~'15.03)	The lowest step of Y purification plant	0.011 (0.00506)	0.00008 (0.00016)	0.0017 (0.00197)	0.01278
	tap water(using direct supply method)	0.013 (0.00552)	0.00100 (0.00074)	0.0040 (0.00293)	0.01800
	tap water(using retention tank)	0.014 (0.00545)	0.00160 (0.00096)	0.0043 (0.00309)	0.01990

Table 5. Result of two-way ANOVA about disinfectant by-products

Source	F value	Sig.	Partial Eta squared	Remark
Corrected model	15.954	0.000*	0.399	Statistically significant
Intercept	574.833	0.000*	0.889	Statistically significant
Water treatment (Standard, Advanced)	43.815	0.000*	0.378	Statistically significant
Supply method (Direct, Retention tank)	2.504	0.118	0.034	Statistically significant in 88% of confidence level

* Statistically significant in 99% of confidence level

감소하고, 제거된 유기물로 인해 반응이 감소하여 잔류 염소의 농도감소가 낮아진 것으로 판단된다. Table 4는 고도정수처리시설 도입 전후의 소독부산물(THMs, HANs, HAAs)의 농도를 나타낸다.

DBPs의 총합의 측면에서 HANs가 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났다. 그러나 HANs는 독성을 나타내는 물질이므로 THMs와 더불어 HANs 및 HAAs를 종합적으로 고려하여 DBPs를 예측하였다.

고도정수처리시설의 도입을 통해 THMs, HANs, HAAs의 농도가 전체적으로 감소되었다. 정수장유출수에서는 평균 0.01063 mg/L의 농도가 감소되어 약 50 % 낮아진 것을 알 수 있었다. 송·배·급수과정에서는 직결식 수용가의 경우 평균 0.01883 mg/L, 저수조식 수용가의 경우 평균 0.02501 mg/L의 농도가 감소되어, 고도정수처리후 송·배·급수과정에서 DBPs 저감에 효과가 있는 것을 확인하였다. THMs의 경우 고도정수처리에 의한 농도는 0.00300 mg/L 감소하였고 수용가로 갈수록 표준정수처리와 비교하여 농도증가폭도 낮아졌다. 이

는 고도정수처리 후 제거된 NOM으로 인해 수계에서 생성되는 소독부산물의 반응이 감소하기 때문이라 판단된다. 다만, 고도정수처리 도입 전후의 수질 차이는 단순한 오차범위 이내의 차이라고 간주될 수 있다.

Table 5는 고도정수처리전·후 및 급수방식에 따른 DBPs 측정값에 대한 고도처리여부와 급수방식의 효과가 차이가 있는지 여부를 파악하기 위해 실시한 이원 분산분석의 결과를 나타낸다. 두 가지 효과에 대한 모형은 모두 통계적으로 유의한 것으로 나타나, 고도처리여부 및 급수방식의 차이가 DBPs 측정결과의 차이를 발생시킨 것으로 나타났다. 세부적으로 THMs, HANs, HAAs 각각에 대해 고도정수처리 전·후의 차이를 분석한 결과, 모두 유의수준 0.05 이하에서 통계적으로 의미 있는 영향을 미치는 것으로 나타났다.

3.2 소독부산물 예측 모델 개발 결과

Table 5에 나타난 결과는 고도정수처리시설 도입



전·후 DBPs의 농도가 통계적으로 다르다는 결과를 나타낸다. 이에 따라 DBPs 예측 모델은 고도정수처리시설 도입 전·후를 구분하여 개발하였다.

DBPs 예측 모델에 포함될 DBPs 영향요인에 대한 상관분석 결과, 표준정수처리공정으로 운영시에는 수용가 DBPs 농도에 정수 수온 ($R=0.757, p=0.000$), 정수 pH ($R=0.298, p=0.070$), 정수 DBPs ($R=0.763, p=0.000$), 정수 잔류염소농도 ($R=0.436, p=0.006$), 관망 내 체류시간 ($R=0.442, p=0.005$)이 영향을 주는 것으로 나타났다. 이 외의 인자들은 통계적으로 유의한 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다.

고도정수처리공정으로 운영시에는 수용가 DBPs 농도에 정수 수온 ($R=0.572, p=0.000$), 정수 pH ($R=-0.530, p=0.001$), 정수 DBPs ($R=0.829, p=0.000$), 정수 잔류염소농도 ($R=0.077, p=0.647$), 관망 내 체류시간 ($R=0.270, p=0.102$)이 영향을 주는 것으로 나타났다. 이 외의 인자들은 통계적으로 유의한 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다.

여기서, 정수장 유출수의 잔류염소 농도와 수용가의 DBPs 농도 사이의 상관관계는 표준정수처리공정에서 더 높게 나타났다. 이와 같은 분석결과가 나타난 이유는 고도정수처리공정을 통해 소독부산물의 전구 물질이 상당수 제거가 되어, 염소소독제로 인한 소독부산물의 발생이 적어지기 때문이라 판단된다.

다음 Equation 1은 표준정수처리공정을 운영할 시 수용가의 DBPs 농도를 예측하기 위한 모델을 개발한 결과이다.

$$Y_A = 0.187 + 0.889 \times (DBPs)_p + (4.001 \times 10^{-4}) \times (Temp)_p - 0.021 \times (pH)_p + (3.990 \times 10^{-4}) \times (Time) + 0.004 \times (Chlorine)_p \quad \text{[Equation 1]}$$

where, Y_A : Concentration of DBPs in standard water treatment (mg/L)
 $(DBPs)_p$: Concentration of DBPs at purification plant (mg/L)
 $DBPs = THMs + HANs + HAAs$
 $(Temp)_p$: Temperature at purification plant ($^{\circ}C$)
 $(pH)_p$: pH at purification plant (-)
 $(Time)$: Retention time (h) (transmission + reservoir + distribution + service)
 $(Chlorine)_p$: Injection concentration of chlorine (mg/L)

$$Y_B = -0.062 + 0.623 \times (DBPs)_p + (1.211 \times 10^{-5}) \times (Temp)_p + 0.011 \times (pH)_p + 0.022 \times (Time) \quad \text{[Equation 2]}$$

where, Y_B : Concentration of DBPs in advanced water treatment (mg/L)
 $(DBPs)_p$: Concentration of DBPs at purification plant (mg/L)
 $DBPs = THMs + HANs + HAAs$
 $(Temp)_p$: Temperature at purification plant ($^{\circ}C$)
 $(pH)_p$: pH at purification plant (-)
 $(Time)$: Retention time (h) (transmission + reservoir + distribution + service)

모델식의 상관계수는 0.888로 나타났으며, 추정값과의 표준오차 역시 0.00354로 나타나 DBPs 측정기기의 검출한계 (0.0002 mg/L)를 고려하였을 때, 충분히 작은 수준으로 판단되었다. 모형에 대한 유의성 검정(분산분석), 회귀계수에 대한 유의성 검정, 독립변수에 대한 공선성 검정 결과 예측 모델은 모두 유의한 것으로 나타나, 최종적으로 회귀 모형을 유의한 것으로 판단하였다.

회귀모형에 포함된 독립변수는 정수장 유출수의 DBPs 농도, 정수장 유출수의 수온, 정수장 유출수의 pH, 정수장 유출수의 잔류염소농도와 관망 내 체류시간으로써, 수용가에서의 DBPs 농도를 예측하기 위해서는 이와 같은 수질 측정 결과가 필요한 것으로 나타났다. 여기서, DBPs 농도, 수온, pH, 잔류염소농도 등과 같은 수질항목은 수질 규정에 의거하여 정수장에서 주기적으로 모니터링되고 있는 수질항목으로써, 항상 데이터베이스화 되어 있는 값이라고 할 수 있다. 또한, 관망 내 체류시간 역시, 구성된 관망도를 활용하여 손쉽게 목표 수용가까지의 체류시간을 도출할 수 있다. 그러므로 본 연구에서 개발한 표준정수처리공정 운영시 DBPs 농도 예측모델은 선행연구의 결과와 비교하였을 때 실제 현장에서의 적용성이 더 높을 것으로 판단된다.

다음 Equation 2는 고도정수처리공정을 운영할 시 수용가의 DBPs 농도를 예측하기 위한 모델을 개발한 결과이다.

모델식의 상관계수는 0.892로 나타났으며, 추정값과의 표준오차 역시 0.00257로 나타나 DBPs 측정기기의

pp. 373-381
 pp. 383-388
 pp. 389-395
 pp. 397-407
 pp. 409-414
 pp. 415-419
 pp. 421-430
 pp. 431-440
 pp. 441-445
 pp. 447-457
 pp. 459-469

검출한계 (0.0002 mg/L)를 고려하였을 때, 충분히 작은 수준으로 판단되었다. 모형에 대한 유의성 검정(분산분석), 회귀계수에 대한 유의성 검정, 독립변수에 대한 공선성 검정 결과 예측 모델은 모두 유의한 것으로 나타나, 최종적으로 회귀 모형을 유의한 것으로 판단하였다.

최종모형 회귀식에는 정수 DBPs 농도, 정수 수온, 수용가 pH, 관망 내 체류시간의 독립변수가 포함되었으나, 정수장 유출수 잔류염소농도는 수용가 DBPs 농도에 대한 설명력이 떨어져 유의한 변수로써 설명되지 못하였다. 이는 고도처리를 통해 소독부산물 전구물질이 저감되어 소독제 투입에 따른 부산물 생성량 자체가 적기 때문인 것으로 판단된다.

3.2 소독부산물 예측 모델의 검증 및 활용

개발한 예측 모델의 검증에는 모델 개발에 활용하지 않은 2015년 6월, 9월, 12월, 2016년 3월에 대상지역의 수용가에서 측정한 수질자료를 이용하였다. 해당 기간은 대상지역이 고도처리로 전환된 이후의 기간이기 때문에 모델의 검증은 고도처리를 대상으로 개발한 모델을 대상으로 실시하였다.

모델의 예측값과 실측값 사이의 상관관계수, 절대오차 및 절대오차율을 검토한 결과, 모델 예측값과 실측값 사이의 상관관계수는 0.96으로, 절대평균오차는 0.0014 mg/L로, 절대오차율은 7.998 %로 나타나 개발한 모델은 실측값을 상당히 잘 모사하는 것으로 판단할 수 있었다.

개발 모델을 수용가의 DBPs 농도가 최대가 되는 조건에 대해 적용하였다. DBPs 농도가 최대가 되는 조건은 정수장의 운영 조건이 최악인 경우(Y 정수장의 고도정수처리시설 도입 후 DBPs 농도 최대값, 수온 최대값, pH 최대값), 물 사용량이 최근 3년간 물 사용량 중 최소를 나타낸(평균 물 사용량의 80%), 즉, 관망 내 체류시간이 최대인 기간을 말한다. 다음 Fig. 4는 설정한 최악조건에서의 SJ배수구역 수용가 DBPs 농도 예측 결과를 나타낸다.

SJ배수구역에서 DBPs의 농도는 0.06 mg/L 미만으로 나타나, 최악의 조건에서도 모든 수질기준을 만족시킬 수 있는 것으로 나타났다. 정수장 운영조건이 최악일 때, SJ배수구역에서는 최소 0.0488 mg/L의 DBPs 농도가 예측되었으며, 배수지부터 수용가까지의 체류시간이 가장 긴 관말지점에서 최대 0.0587 mg/L의

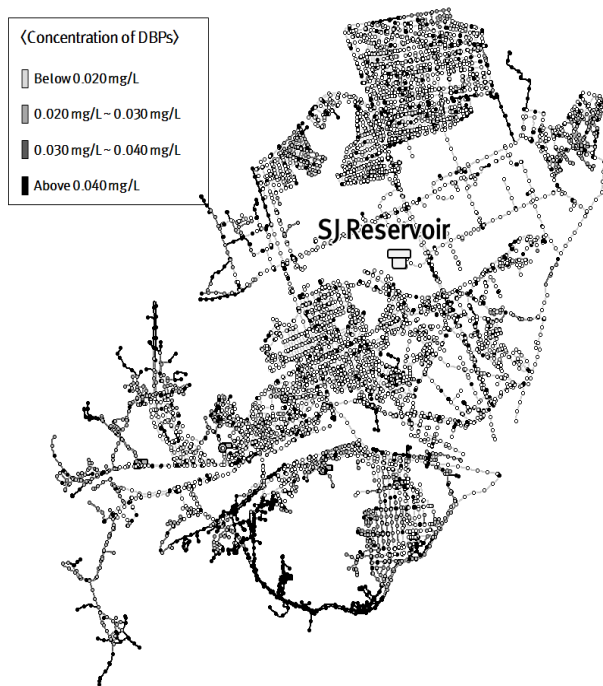


Fig. 4. Prediction of DBPs concentration in worst condition(SJ supply area).

DBPs 농도가 예측되었다. 연구대상지역의 정수장 최악운영조건 및 관망 내 체류시간이 최대인 조건에 대하여 수용가의 DBPs 농도 분포를 분석한 결과 DBPs 농도로 인한 문제는 발생하지 않을 것으로 판단된다.

DBPs 농도가 높은 지역은 배수지로부터 거리가 멀고, 고도가 높아 체류시간이 45 h 이상인 지역으로 분석되었다. 현재 이 지역은 직결식 급수방식보다 저수조식 급수방식을 사용하고 있는 경우가 많은 것으로 파악되었다. 따라서 향후 SJ배수구역에 대한 상수도 관망 재정비 사업 또는 수도정비기본계획을 수립할 시에는 수용가 소독부산물의 농도를 고려하여 이 지역에 분포하고 있는 저수조식 급수방식을 직결식 급수방식으로 변경하는 것이 타당하다고 판단된다.

다음 Table 6은 동일한 고도정수처리 도입 전·후의 최악 운영 조건에서, SJ배수구역 수용가의 DBPs 농도를 도출한 결과이다. 결과에서 알 수 있듯이, 표준정수처리를 실시할 때에 비해 고도정수처리를 실시할 때 DBPs 농도를 평균 1.71배 저감할 수 있는 것으로 나타났다. 만약 Y정수장에 고도정수처리시설이 도입되지 않았다면, 최악의 운영조건에서 DBPs 농도의 최댓값은 0.0967 mg/L으로 예측되었다.



Table 6. Comparison result of DBPs concentration in worst condition

Classification	Condition	DBPs concentration (mg/L)		
		Minimum	Average	Maximum
Standard treatment	- (Temp) _P : 27°C - (pH) _P : 7.5	0.0792	0.0870	0.0967
Advanced treatment	- (Chlorine) _P : 0.83 mg/L - (DBPs) _P : 0.040 mg/L	0.0488	0.0510	0.0587

현재 우리나라는 DBPs중 THMs, HANs, HAAs의 법적 먹는물 수질기준을 각각 0.1 mg/L 미만으로 지정하고 있다. 법적인 기준을 고려하였을 때 연구대상지역에 DBPs와 관련된 문제는 발생하지 않을 것으로 판단된다. 다만, DBPs 저감과 관련된 고도정수처리의 효과를 고려하였을 때, 타 지역에서도 고도정수처리 시설 도입을 검토할 필요성이 있다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 고도정수처리시설 도입 전·후 배수 관망 및 수용가에서 발생하고 있는 DBPs 예측모델을 개발하기 위해 10년 이상 축적된 수질데이터를 수집하였으며, 이를 활용하여 개발한 모델을 현장에 적용함으로써, 수용가에서의 DBPs 변화를 예측하기 위한 방법론을 제안하였다.

먼저, 고도정수처리시설 도입 전·후의 수질 차이를 통계적으로 검증하기 위해 이원 분산분석을 실시한 결과 고도처리전·후의 수질차이는 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 다음으로, 고도정수처리시설 도입 전·후의 수용가 DBPs를 예측하기 위한 중회귀모형을 개발한 결과, 개발한 모델은 실측값과의 상관계수가 모두 0.88 이상으로 나타나 실측값을 상당히 잘 모사하는 것으로 나타났다. 또한, 개발한 모델의 검증을 위해 모델 개발에 사용하지 않은 기간에 대한 예측 결과 역시 실측값과의 상관계수가 0.96 이상으로 나타났다. 본 연구에서 개발한 예측 모델은 모델을 구성하는 변수가 타 모델에 비해 비교적 간편하다는 장점을 가져 추후 활용가능성이 높을 것으로 판단된다.

다만, 본 연구에서 제안한 모델은 연구대상지역의 정수장 및 급수체계를 대상으로 개발되어 제안된 상황 이외에는 적용이 어려울 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 방법론을 활용하여 해당 정수장 및 급수 체계에 적합한 모델을 개발하여 적용함이 바람직하다

고 판단된다. 또한, 제안된 모델이 고도처리공정에 특정하기 위해서는 연구대상지역과 상이한 고도처리공정이 도입된 정수장과 급수체계에 대해서도 추가적인 검토 및 연구가 필요하다고 판단된다.

본 연구에서 제안한 방법론 및 연구의 결과는 향후 DBPs와 관련된 소비자의 요구 수준에 대응하고, 수도 정비기본계획 수립, 상수도관망 재정비 계획 수립, 상수도시설의 자산관리계획 수립시 서비스수준 분석 및 설정 등에 활용할 수 있을 것이라 판단된다.

사 사

본 연구는 환경부 “글로벌탑 환경기술개발사업 (2016002120006)”으로 지원 받은 과제입니다.

References

Amy, G., Siddiqui, M., Ozekin, K., Zhu, H. W. and Wang, C. (1998) *Empirically based models for predicting chlorination and ozonation by-products*, USEPA Office of Groundwater and Drinking water, Cincinnati, OH.

Gang, D. D., Segar, R. L., Clevenger, T. E. and Banerji, S. K. (2002) Using chlorine demand to predict TTHM and HAA9 formation, *Journal of AWWA.*, 94, 76-86.

Gallard, H. and von Gunten, U. (2002). Chlorination of natural organic matter: kinetics of chlorination and of THM formation. *Water Res.*, 36 (1), 65-74.

Han, S. H. (2003) The prediction of chlorine decay and THMs formation in distribution systems, Master Thesis, University of Seoul, pp.77.

Kim, H. G., Eom, H. K., Lee, D. H. and Joo, H. J. (2015) A study on removal of natural organic matter (NOM) and application of advanced water treatment processes for controlling disinfection by-products, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 31 (5), 563-568.

Langlais, B., Reckhow, D. A., Brink, D. R. (1991). *Ozone in*

pp. 373-381

pp. 383-388

pp. 389-395

pp. 397-407

pp. 409-414

pp. 415-419

pp. 421-430

pp. 431-440

pp. 441-445

pp. 447-457

pp. 459-469

- Water Treatment: Application and Engineering*. American Water Works Association Research Foundation, Denver, CO.
- Lee, K. C., Gegal, B. C., Choi, I. H. and Lee, W. T. (2015). Formation characteristics and control of disinfection byproducts in a drinking water treatment plant using lake water, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 37 (5), 269-276.
- Lee, D. J., Kim, Y. I., Kim, S. S., Lee, K. H. and Park, H. A. (2007) Effect of advanced treatment process for residual chlorine decay and THM formation in water distribution system, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 29 (4), 419-424.
- MOE, (2015) Standard method for drinking water - QA/QC(ES 05001.a), MOE 2015-214.
- Owen, D. M., Amy, G. L. and Chowdhury, Z. K. (1993). *Characterization of natural organic matter and its relationship to treatability*. AWWAR. Denver.
- Singer, P. C. (1994). Control of disinfection by-products in drinking water. *Journal of Environmental Engineering*, 120 (4), 727-744.
- Son, H. J., Roh, J. S., Kim, S. G., Kang, L. S. and Lee, Y. D. (2005). The removal of natural organic matter and disinfection by-product precursor by ozone, *Journal of Korean Society of Environmental Engineering*, 27 (10), 1099-1107.
- Stevens, A. A., Slocum, C. J., Seeger, D. R. and Robeck, G. G. (1976). Chlorination of organics in drinking water. *Journal American Water Works Association*, 68 (11), 615.
- Symons, J. M., Krasner, S. W., Simms, L. A. and Scilimenti, M. (1993). Measurement of THM and precursor concentrations revisited: the effect of bromide ion. *Journal of the American Water Works Association*, 85 (1), 51-62.
- Trussell, R. R. and Umphres, M. D. (1978). The formation of trihalomethanes. *Journal of AWWA.*, 70 (11), 604-12.
- Urano, K., Wada, H. and Takemasa, T. (1983). Empirical rate equation for trihalomethane formation with chlorination of humic substances in water. *Water Res.*, 17 (12), 1797-1802.
- Westerhoff, P., Redriquez, H. M., Bakerb, L. and Sommerfeld, M. (2005). Seasonal occurrence and degradation of 2-methylisoborneol in water supply reservoir, *Water Research*, 39, 4899-4912.