



수돗물 위해요소 리스크 관리를 위한 물안전계획 적용 연구

A study on the application of water safety plans for the hazard risk management of tap water

김진근^{1*}·김두일²
Jinkeun Kim^{1*}·Dooil Kim²

¹제주대학교 환경공학과, 제주특별자치도 제주시 제주대학로 102, 63243

²단국대학교 토목환경공학과, 경기도 용인시 수지구 죽전로 152, 16890

¹Department of Environmental Engineering, Jeju National University, 102, Jejudaehak-ro, Jeju-si, Jeju-do 63243, Republic of Korea

²Department of Civil and Environmental Engineering, Dankook University, 152, Jukjeon-ro, Suji-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 16890, Republic of Korea

pp. 243-250

pp. 251-258

pp. 259-268

pp. 269-279

pp. 281-289

pp. 291-297

pp. 299-309

pp. 311-319

ABSTRACT

One of the most effective methods to consistently ensure the safety of a tap water supply can be achieved by application of a comprehensive risk assessment and risk management approach for drinking water supply systems. This approach can be termed water safety plans(WSP) which recommended by WHO(world health organization) and IWA(international water association). For the introduction of WSP into Korea, 150 hazards were identified all steps in drinking water supply from catchment to consumer and risk assessment tool based on frequency and consequence of hazards were developed. Then, developed risk assessment tool by this research was implemented at a water treatment plant(Q=25,000 m³/d) to verify its applicability, and several amendments were recommended; classification of water source should be changed from groundwater to stream to strengthen water quality monitoring contaminants and frequencies; installation of aquarium to monitor intrusion of toxic substances into raw water; relocation or new installation on-line water quality analyzers for efficient water quality monitoring; change of chlorination chemical from solid phase(Ca(OCl)₂) to liquid phase(NaOCl) to improve soundness of chlorination. It was also meaningful to propose hazards and risk assessment tool appropriate for Korea drinking water supply systems through this research which has been inconsistent among water treatment authorities.

Key words: Hazard, Reliability, Risk management, Water safety plan, Tap water

주제어: 위해요소, 신뢰성, 리스크 관리, 물안전계획, 수돗물

1. 서 론

국내 상수도시설은 1908년 서울시 푼도 정수장이 최초 완공된 이후로 지속적인 시설확장을 이루어 왔으며, 특히 경제발전기인 1980년대를 전후해서 정수

장의 신설이 급속하게 증가하였다. 한편, 산업화와 더불어 많은 오염물질 배출시설이 상수원 유역내에 신설되었고, 이러한 시설의 운영 과정에서 사용되는 원료물질 또는 폐수들이 상수원에 유입될 수 있는 위험성도 동시에 증가하게 되었다.

실제 1991년 공업시설에서 누출된 폐놀의 낙동강 유입사고는 상수원에 존재하는 산업시설에서의 오염

Received 19 March 2019, revised 31 July 2019, accepted 2 August 2019.

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

물질 유출이 얼마나 상수원에 큰 영향을 미칠 수 있으며 또한 그 파급효과의 심각성에 경종을 울린 대표적인 사례라고 볼 수 있다. 이후 낙동강 유역에서는 2008년에도 산업시설의 화재사고 진화과정 중에 소화수에 포함된 폐놀이가 낙동강에 유입되어 일부 지역에서 취수중단 및 수돗물 공급이 중단되는 사고가 발생하기도 하였다.

수돗물은 국민의 생명수로서 고품질의 수돗물이 중단 없이 공급되어야 한다는 것이 소비자가 원하는 최소한의 서비스수준이며 수도사업자도 이를 위해서 상수원 수질보호, 정수처리 공정개선, 공급과정중의 수량, 수압, 수질관리 등에 많은 노력을 하고 있다. 그러나, 아직도 상수원으로 오염물질 유입, 수돗물 생산과정에서 수처리제의 과다 및 과소주입 등 크고 작은 다양한 위해요소(hazard)에 의한 사고가 발생하고 있다. 또한 인위적인 오염물질은 아니지만 조류에 기인한 geosmin, 2-MIB 등 이취미물질 농도의 증가도 수돗물에 대한 신뢰도 저하를 유발할 수 있다.

최근에는 집중호우 및 가뭄 등 기후변화에 의한 위험이 증가하고, 산업화 및 도시화에 따른 오염물질 증가, 상수도 시설 노후화 등 다양한 측면에서 수돗물의 안전성에 영향을 미치는 위해요소가 증가하고 있다. 따라서 고품질의 수돗물을 중단 없이 생산공급하기 위해서는 급증하는 물안전 위해요소에 대한 사후 대응 보다는 사전 예방적 대응체계를 구축하여 수돗물의 안전성을 향상시키는 것이 바람직하다.

EU, 일본, 호주 등에서는 수돗물 신뢰도 향상을 위해 세계보건기구(WHO, world health organization) 및 국제물협회(IWA, international water association)에서 공동으로 개발한 물안전계획(WSP, water safety plan)을 도입하여 사전 예방적 물안전 대응체계를 구축하고 운영중에 있다. WSP는 수돗물 생산공급의 전과정에 대한 위해요소 도출, 위해요소에 대한 위해성(risk) 평가, 위해요소 관리방안 수립 및 적용, 모니터링 방안 제시 등을 통해 수돗물 안전성을 사전에 점검하고 개선방향을 제시하는 선진화된 물안전관리기법으로 평가된다 (Kim, 2012; KWVA, 2018).

수돗물에 대한 신뢰성을 향상시키기 위해서는 상수원유역-정수처리-수돗물공급-수도꼭지의 전과정에 대해 유입될 수 있는 유해물질 및 위해요소를 파악하고 유입가능농도, 발생빈도, 유입시 피해발생 정도 등을 토대로 위해성 평가를 실시하여야 한다. 위해성 평가

를 바탕으로 수도시스템에서 해당물질에 대한 제어방안의 실효성을 평가하고 미흡할 경우 개선대책의 수립을 포함하는 물안전계획(WSP)을 수립하는 것이 필요하다 (WHO and IWA, 2009).

국내에서는 현재까지 WSP를 국가차원에서 제도화하여 운영중인 사례는 없으나, 일부 수도사업자가 자체적으로 WSP를 도입운영중에 있다. K-water에서는 36개 광역상수도 전 정수장에 2012년부터 WSP 제도를 도입하여 운영이며, 서울시는 산하 6개 전 정수장에 대해 WSP 개념이 반영된 식품안전경영시스템(FSMS, food safety management system)인 ISO 22000을 2016년부터 도입하여 운영중에 있다 (KWVA, 2018). 한편, 환경부에서는 안심하고 믿고 마시는 수돗물 생산을 위해 전국수도종합계획(MOE, 2016)에 WSP제도 도입계획을 반영하여 국가 제도화 후 국내 수도사업장에 확대 도입하는 것을 추진 중에 있다.

국내 정수장에서는 수도사업자별로 취정수장 수질 사고 대응 매뉴얼과 같은 위해요소 대응방안을 수립하여 위해요소에 대한 리스크를 관리하고 있으나, 일부 대규모 수도사업자를 제외하고는 대부분 정부의 가이드라인에 근거한 획일적인 내용 위주로 구성되어 실효성이 부족한 상태로서 국내 실정에 적합한 한국형 WSP는 미흡한 상황이다.

따라서, 본 연구에서는 수도시설의 수질 안전성과 물공급의 안정성 향상 및 예방적 위해요소 대응체계 구축을 위해 국내외의 WSP 도입사례 및 유사제도를 분석하고 국내 실정에 적합한 위해요소 도출과 리스크 평가 도구를 개발하며 도출된 리스크 평가 도구를 실규모 정수장에 시범 적용후 수도시설에 대한 개선방안을 도출하였다. 본 연구가 향후 한국형 물안전계획의 국가 제도화에 토대가 되기를 기대한다.

2. 연구대상 및 방법

WHO에서는 수돗물 신뢰도 향상을 위하여 주로 식품 관련 분야에서 적용되고 있는 위해요소중점관리기준(HACCP, hazard analysis and critical control point)의 평가 도구를 활용하여 수돗물 생산공급과정에 적용할 것을 제안하였고, 이러한 개념이 바로 WSP이다 (WHO, 2005; WHO, 2008). 수도시설에 WSP 도입의 구체적인 방안을 수록하고 있는 것이 WHO와 IWA가 공동으로 작성한 Water Safety Plan Manual(부제 : step-by-step risk



Table 1. Semi-quantitative risk matrix(WHO and IWA, 2009)

Classification				Consequence or Severity				
				Insignificant	Minor compliance impact	Moderate aesthetic impact	Major regulatory impact	Catastrophic public health impact
				1	2	3	4	5
Frequency	Almost certain	Once a day	5	5	10	15	20	25
	Likely	Once a week	4	4	8	12	16	20
	Moderate	Once a month	3	3	6	9	12	15
	Unlikely	Once a year	2	2	4	6	8	10
	Rare	Once every 5 years	1	1	2	3	4	5
Risk score		<6		6-9		10-15		>15
Risk rating		Low		Medium		High		Very high

management for drinking-water suppliers)이다 (WHO and IWA, 2009).

본 연구에서는 WSP 매뉴얼을 바탕으로 국내 수도 물 생산 및 공급과정에서 존재할 수 있는 위해요소의 목록을 발굴하고 해당 위해요소에 대한 리스크 평가 도구를 개발하였다. 위해요소 발굴을 위해서는 WSP 매뉴얼에 제시된 위해요소의 목록 외에 서울시, K-water, 일본의 사례 등을 검토하여 150항목에 대한 위해요소 목록을 제안하였다.

위해요소에 대한 리스크 평가를 위해서는 Table 1, 2와 같이 WSP 매뉴얼에서 제안하고 있는 리스크 매트릭스를 적용하였다. WSP에서 위해요소 분석이란 수도물 안전에 영향을 줄 수 있는 위해요소와 이를 유발할 수 있는 조건의 존재 여부를 판별하기 위하여 필요한 정보를 수집하고 평가하는 일련의 과정이다. 즉, 수도물이 생산, 공급단계를 거쳐 최종적으로 소비자에게 전달될 때까지의 각 단계에서 발생할 우려가 있는 위해요소를 파악하고, 위해요소의 발생빈도(frequency) 및 영향정도(consequence)를 검토하여 리스크 수준을 결정하게 된다.

한편, 본 연구에서 도출된 위해요소 150개 항목에 대해 제주특별자치도 K 정수장(Q = 25,000 m³/d)을 대상으로 적용성 평가를 실시하였다. K 정수장은 대부분 용천수에 기인한 하천에서 원수를 취수하고 약품

Table 2. Examples of definitions of consequence categories (WHO, 2008)

Consequence categories	Definitions
Catastrophic	Potentially lethal to large population
Major	Potentially lethal to small population
Moderate	Potentially harmful to large population
Minor	Potentially harmful to small population
Insignificant	No impact or not detectable

응집-침전-급속여과-염소(차아염소산칼슘)소독-급수의 체계를 갖는 전형적인 급속여과시스템의 수처리공정으로 구성되어 있다.

K 정수장의 취수시설은 지하수의 용출지점으로부터 약 150 m 하류에 위치하고 있으며 취수시설 하단에 인공적인 보를 건설하여 평상시에는 취수 수심을 약 2.6 m 정도 유지하고 있다. 비강우시에는 원수탁도가 대부분 0.5 NTU 이하의 양호한 수질을 나타내는 전형적인 용천수의 특성을 갖고 있으나 집중호우시에는 인근 유역의 강우 유출수 유입으로 인해 일시적으로 탁도가 20 NTU까지 상승하는 하천수의 특성을 갖고 있다. 일반적인 용천수를 상수원으로 하는 제주지역 정수장의 경우에는 완속여과시스템으로 구성된 수처리 시스템을 갖고 있지만 K 정수장의 상수원은 집

pp. 243-250

pp. 251-258

pp. 259-268

pp. 269-279

pp. 281-289

pp. 291-297

pp. 299-309

pp. 311-319



Fig. 1. Intake facility of K water treatment plant(WTP).

중호우기에 하천수의 수질 특성을 갖고 있으므로 K 정수장의 수처리공정은 고탁도에도 정수처리가 가능한 급속여과시스템으로 구성되어 있다. Fig. 1은 WSP 적용 시범사업장인 K 정수장 취수원 전경을 나타내고 있다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 위해요소(hazards) 도출

수돗물 생산공급시스템에서의 위해요소 도출을 위해 K-water 위해요소 점검·평가 편람(160항목)(K-water, 2015)과 서울시 물안전계획 도입 연구(119항목)(Seoul Water Research Institute, 2017), 일본 후생노동성의 물안전기법 위해요소(238항목)(Japan Ministry of Health, Labour and Welfare, 2008) 등을 참고하여 국내 실정에 적합한 위해요소 목록을 도출하였다.

상수도시스템에 존재하는 잠재적인 위해요소의 추출은 먼저 수원유역에서 시작하여 취수, 도수, 정수, 배수와 급수 각 공정에서 발생이 예상되는 위해요소를 검토하고 확정하였다. 수돗물을 생산공급하는 각 공정, 단계별에서 발생 가능한 위해요소로 유역 27항목, 상수원 33항목, 취수시설 7항목, 착수정 15항목, 혼화응집시설 8항목, 침전시설 5항목, 급속여과시설 4항목, 완속여과시설 4항목, 막여과시설 3항목, 고도처리시설 6항목, 정수지 16항목, 배수지 7항목, 급배수과정 15항목 등 총 150항목의 위해요소를 도출하였으며, 이를 바탕으로 수도사업자별로 현장 여건을 고려하여

위해요소를 가감하여 활용할 수 있을 것으로 판단된다 (KWWA, 2018).

유역에서 발생 가능한 위해요소의 예로는 호우에 의한 pH 등 수질 변화와 유역내 차량, 선박 등 교통수단의 사고로 인해 유입되는 비점오염원, 산업시설에서 배출되는 화학물질, 폐수 등 점오염원과 지형, 지질에 의한 오염물질의 유입 등이 있다. 또한, 호소에서 부영영화 및 수온 증가 등에 의한 영향으로 발생하는 이취미 물질 등도 고려할 수 있다. Table 3은 유역에서 발생 가능한 27개 항목의 위해요소 목록을 제시하고 있다.

정수처리공정에서 발생 가능한 위해요소는 원수에서 유입된 오염물질이 정수처리 과정에서 완전히 제거되지 않은 상태에서 정수로 유출되는 경우와 정수처리 과정 자체에서도 발생 할 수 있다. 예를 들면, 장마철 과도한 탁질 유입 시 미처리된 탁질물질로 인한 정수 탁도 상승, 과도한 염소소독으로 인한 고농도 소독부산물 발생, 여과지 공정 효율 저하로 인한 여과수 탁도 상승, 정수약품 과다 주입 등으로 인한 pH 저하 및 알루미늄 농도 상승 등이 발생할 수 있다. 그 외 소독제의 농도와 접촉시간에 영향을 받는 적정 CT값 확보여부도 병원성 미생물 제어에 중요한 위해요소라 할 수 있다. Table 4는 정수처리공정의 최종 단계인 정수지에서 발생할 수 있는 위해요소를 제시하고 있다.

한편, K 정수장을 대상으로 위해요소를 도출한 결과 모두 98항목이 도출되었다. K 정수장은 지하수 용천으로부터 150 m 하류에서 취수하여 혼화응집-침전-급속여과-정수지-급배수 순으로 수돗물을 생산공급



Table 3. Example of hazards in catchment

No	Hazard	Major hazardous events	Monitoring status		
			Seoul	K-water	Japan
1	1,4-Dioxane	Inappropriate wastewater treatment, dumping	o	x	o
2	2-MIB	Inappropriate wastewater treatment, eutrophication of lake, algal bloom	o	x	o
3	Geosmin	Inappropriate wastewater treatment, eutrophication of lake, algal bloom	o	x	o
4	Cr ⁺⁶	Inappropriate wastewater treatment, dumping, geology	o	x	o
5	pH	Inappropriate wastewater treatment, dumping, heavy rainfall	o	x	x
6	TOC (KMnO ₄ consumption)	Inappropriate wastewater treatment, dumping	o	x	x
7	Lead	Inappropriate wastewater treatment, dumping,	o	x	o
8	Protozoa	Inappropriate wastewater treatment, agriculture	x	x	o
9	Pesticides	Agriculture, dumping	x	x	o
10	Coliform	Inappropriate wastewater treatment, Breakage of septic tank	x	x	o
11	Dichloromethane	Inappropriate wastewater treatment, dumping	o	x	o
12	Manganese	Inappropriate wastewater treatment, dumping, turn-over of lake	x	x	o
13	Benzene	Inappropriate wastewater treatment, dumping	o	x	o
14	Fluoride	Inappropriate wastewater treatment, dumping, geology	o	x	x
15	Arsenic	Inappropriate wastewater treatment, dumping	o	x	o
16	Mercury	Inappropriate wastewater treatment, dumping	o	x	o
17	Cyanide	Inappropriate wastewater treatment, dumping	o	x	o
18	Zinc	Inappropriate wastewater treatment, dumping, geology	o	x	x
19	Antimony	Inappropriate wastewater treatment, mining	x	x	o
20	Ammonia	Inappropriate wastewater treatment, dumping, livestock	o	x	o
21	Oil	Inappropriate wastewater treatment, dumping, spill, car accident	o	x	o
22	ABS	Inappropriate wastewater treatment	x	x	o
23	Nitrate	Inappropriate wastewater treatment, dumping, agriculture, livestock	o	x	o
24	Cadmium	Inappropriate wastewater treatment, dumping, geology	o	x	x
25	Tetrachloroethylene	Inappropriate wastewater treatment, dumping	o	x	o
26	Trichloroethylene	Inappropriate wastewater treatment, dumping	o	x	o
27	Phenol	Inappropriate wastewater treatment, dumping	o	x	o

하는 관계로 본 연구에서 제안한 150개의 위해요소 목록에서 유역에 해당되는 27항목, 상수원에서 조류 관련 5항목, 취수에서 조류관련 1항목(Microcystin), 착수정 2항목(2-MIB, geosmin), 혼화응집 2항목(2-MIB, geosmin), 완속여과 4항목, 막여과 3항목, 고도처리 6항목, 정수지 2항목(2-MIB, geosmin)을 제외한 98개 위해요소 항목이 도출되었다.

3.2 위해요소 리스크 평가

위해요소 리스크 평가의 목표는 중대한 위험과 덜 심각한 위험을 구별하는 것에 있다. 이를 수행하는 가장 좋은 방법은 모든 잠재적 사건과 관련 위험을 체계적으로 기록하고 위험의 정도를 평가하는 표를 작성하는 것이며, 위해요소 리스크 평가 과정을 진행할 때는 Table 1과 같이 위해요소의 발생빈도와 피해정도에

Table 4. Example of hazards in clearwell

No	Hazard	Major hazardous events	Monitoring status		
			Seoul	K-water	Japan
113	2-MIB	Insufficient adsorption or oxidation(ozonation etc.)	o	o	x
114	Geosmin	Insufficient adsorption or oxidation(ozonation etc.)	o	o	x
115	Turbidity	Malfunction of coagulant feeding, flooding	o	o	o
116	Phenol	Insufficient adsorption or oxidation(ozonation etc.)	o	o	x
117	Taste and Odor	Insufficient adsorption or oxidation(ozonation etc.)	o	o	x
118	pH	Inappropriate coagulation, spill of chemicals	o	o	x
119	Residual Chlorine	Inappropriate chlorination	o	o	o
120	Cyanide	Vandalism, terror	o	x	x
121	Arsenic	Vandalism, terror	o	o	x
122	Manganese	Inappropriate oxidation, adsorption, filtration	x	o	x
123	Nitrate	Fertilizer, geology, malfunction of membrane	x	o	x
124	Heterotrophic Plate Counts	Inappropriate disinfection	x	x	o
125	Coliforms	Inappropriate disinfection	x	x	o
126	Debris	Breakage of vent, insufficient removal of turbidity	x	x	o
127	Chlorate	Low quality of NaOCl	x	x	x
128	Bromate	Low quality of NaOCl, by-product of ozonation	x	x	x

대한 구체적인 정의가 필요하다. 이러한 정의는 리스크 평가의 객관성을 유지하고 리스크 매트릭스 점수를 미리 정하는데 의미가 있다 (WHO and IWA, 2009).

위해요소의 리스크 정보는 개별 위해요소별 화학물질 정보, 관련 규정 등을 통해 확보할 수 있으며 리스크 등급 평가를 위한 데이터가 충분하지 않은 경우에는 추후 조사가 진행되어 자료가 축적되고, 명확한 평가가 내려질 때까지 발생 가능한 리스크에 유의해야 한다. 또한 위해요소의 리스크 평가는 각 시스템마다 환경 및 성상이 다르기 때문에 시스템별로 각각의 평가기준이 고려되어야 한다. 예를 들면 동일한 위해요소가 존재할 경우에도 수도시스템의 구성이 완속여과, 급속여과, 고도처리시설 등의 유무에 따라 리스크 등급은 상이하게 판단될 수 있기 때문이다.

위해요소의 리스크 수준은 추출된 위해요소에 대해서 발생빈도의 조사, 영향정도의 파악, 위해요소 리스크 수준 설정후 위해요소 리스크 수준 비교 검증 및 확정의 4단계를 거쳐 해당 수준을 설정한다. 이러한 리스크 수준은 새로운 관리조치 도입의 필요성과 의사결정에 있어서 우선순위를 판단하는 근거가 되며, 상수도시스템의 효율적인 예방적 관리를 가능케 한다.

위해요소의 영향정도 및 발생빈도로부터 리스크 등

급 설정 매트릭스를 활용하여 위해요소의 리스크 등급을 설정하였으며, 리스크 매트릭스에서는 Likert 척도 중 일반적으로 사용하는 5점 척도를 이용하였다. 위해요소의 평가 시 Table 1,2의 평가기준을 활용하여 리스크 등급을 산정하였다 (WHO and IWA, 2009).

각 공정별로 추출된 위해요소에 대해서 위해요소 형태와 판단기준 등을 정리한 한국형 위해분석표(안)의 예시는 Table 5와 같다. 위해분석표는 위해요소별로 미리 설정된 판단기준을 토대로 발생빈도 및 중요도의 점수에 따라서 리스크 점수를 도출하고, 리스크 등급을 결정 결과에 따라 리스크 관리 개선방안 및 계획을 수립한다. 각 평가의 기준은 현장점검, 수질분석결과, 현행법으로 명시된 기준 등을 근거하여 설정하였다.

Table 5는 Table 3에 표기된 유역에 존재할 수 있는 위해요소 1, 2번 항목과 Table 4에 표기된 정수지에 존재할 수 있는 위해요소 115, 118번 항목에 대한 위해분석표를 예시하고 있다.

1,4-Dioxane에 대한 리스크 평가를 위해서는 우선 발생빈도와 위험도에 대한 분석이 필요하다. 발생빈도 분석을 위해서는 과거 3년간의 수질측정자료를 바탕으로 하여 WHO의 먹는물 가이드라인 농도인 50



Table 5. Example output of hazard and risk assessment

NO	Hazard	Hazard identification criteria	Criteria	A	B	A×B	Risk	Facility improvement	monitoring
1	1,4-Dioxane	<ul style="list-style-type: none"> Data : At least 3 year water quality monitoring results Criteria : more than 50 ng/L(WHO drinking water guideline) Check contents <ul style="list-style-type: none"> ① A score : 5 ② B score : frequency 	A(consequence) B(frequency)) <ul style="list-style-type: none"> once every 3 years : 1 once every 2 years : 2 once a year : 3 twice a year : 4 once a month : 5 	5	4	20	very high	installation of advanced treatment processes (GAC+O ₃)	lab test
2	2-MIB	<ul style="list-style-type: none"> Data : At least 3 year water quality monitoring results Criteria : more than 100 ng/L(5 times of Korean ministry of environment guideline) Check contents <ul style="list-style-type: none"> ① A score : 3(advanced treatment facility including PAC), 5(other processes) ② B score : frequency 	A(consequence) B(frequency)) <ul style="list-style-type: none"> once every 3 years : 1 once every 2 years : 2 once a year : 3 twice a year : 4 once a month : 5 	3	4	12	high	Installation of PAC feeding system	lab test
115	Turbidity	<ul style="list-style-type: none"> Data : At least 3 year water quality monitoring results(daily data) Criteria : more than 0.5 NTU(Korean ministry of environment guideline) Check contents <ul style="list-style-type: none"> ① A score : 5 ② B score : frequency 	A(consequence) B(frequency)) <ul style="list-style-type: none"> once every 3 years : 1 once a year : 2 once a month : 3 twice a week : 4 once a day : 5 	5	1	5	low	-	on-line analyzer
118	pH	<ul style="list-style-type: none"> Data : At least 3 year water quality monitoring results(daily data) Criteria : less than 5.8, more than 8.5(Korean ministry of environment guideline) Check contents <ul style="list-style-type: none"> ① A score : 4 ② B score : frequency 	A(consequence) B(frequency)) <ul style="list-style-type: none"> once every 3 years : 1 once a year : 2 once a month : 3 twice a week : 4 once a day : 5 	4	2	8	medium	installation of CO ₂ feeding system	on-line analyzer

ng/L를 초과하는 농도가 월 1회 이상 발생하였을 경우에는 발생빈도 점수를 5점, 년 2회 이상 발생시는 4점, 년 1회 이상 발생시는 3점 등의 점수를 부여하였다. 1,4-Dioxane에 대한 위험도 점수는 1998년부터 미국 캘리포니아주 법률로 발암물질로 규정되는 현실 등을 고려하여 5점을 부여하였다 (Wikipedia, 2019).

한편, 주로 남조류에 기인하는 이취미 물질인 2-MIB의 경우에도 1,4-Dioxane의 경우와 동일하게 발생빈도에 대한 점수를 부여하였다. 판단기준이 되는 발생농도의 경우에는 환경부 먹는물 감시항목 기준 농도인 20 ng/L의 5배인 100 ng/L를 기준으로 하였는데 이는 해당 시로 채취 지점이 유역에 해당되어 상대적으로 기준 농도를 높게 설정하였다. 한편 착수정의 경우에는 2-MIB의 기준 농도를 환경부 감시항목 기준 농도와 동일하게 20 ng/L로 설정하였다 (KWWA, 2018).

2-MIB의 위험중요도를 평가함에 있어서는 Table 2의 판정기준에서 2-MIB는 심미적 물질로 생명에 치명적인 수준은 아니지만 수돗물에 대한 신뢰도에 매우 부정적인 영향을 미치므로 3점 또는 5점을 부여하였다. 위험중요도의 점수가 3점과 5점으로 차이가 발생하는 것은 해당 시설에 고도정수처리공정을 갖추어서 2-MIB 농도의 상당한 부분의 저감이 예상될 경우에는 3점을 부여하였으며, 2-MIB에 대한 높은 제거율을 기대하기가 상대적으로 어려운 완속여과, 급속여과 시설의 경우에는 5점을 부여하여 현장 시설의 특성을 반영하였다.

3.3 시범 정수장 적용 사례 분석

상수도시설에서 WSP을 수립하고 실행하는 궁극적 목적은 실제 수돗물의 생산과 공급과정에 관련되는 상수원부터 수도꼭지 전과정에 대해 위해요소에 대한

pp. 243-250

pp. 251-258

pp. 259-268

pp. 269-279

pp. 281-289

pp. 291-297

pp. 299-309

pp. 311-319

대응력을 향상시켜 수질사고 발생을 미연에 방지하고 유해물질이 유역, 정수장 또는 급수과정에 유입되었을 경우 사전에 준비된 표준운영절차(SOP)에 의해 적절히 대응함으로써 2차 피해를 최소화하는 것이다.

이미 국내 일정 규모 이상의 수도사업자는 대부분 수질사고 대응 매뉴얼 등을 구비하고 있다. WSP는 기존의 수질사고 대응 매뉴얼을 완전히 폐기하고 새로운 계획을 수립하는 것이 아니고 기존의 매뉴얼을 바탕으로 WSP라는 체계화된 도구를 이용하여 한단계 향상된 물안전계획을 수립하는 것이다.

WSP 매뉴얼에 근거한 추진절차에 따라 K 정수장을 대상으로 WSP를 적용한 결과, 위해요소로는 98항목이 도출되었으며, 정량적인 위해성 평가 결과는 상수원의 특성상 오염물질의 농도가 매우 낮고 인근에 오염원이 적어서 대부분 리스크 점수가 5점 이하로 리스크 등급이 낮음으로 평가되었다. 한편, 정성적인 평가를 통해서 다음과 같은 개선사항을 도출할 수 있었다.

첫째, K 정수장의 경우 비강우시의 원수 탁도는 대부분 수돗물의 먹는물 수질기준인 0.5 NTU 이하였으나, 집중호우시에는 일정 부분 지표 강우 유출수의 유입 영향으로 탁도 상승이 관찰되기도 하였다. 그러나 K 정수장에서는 상수원을 지하수(용천수)로 분류하여 하천수보다 완화된 원수 수질모니터링을 실시하고 있었다.

환경부에서는 상수원의 분류(하천수, 호소수, 복류수, 강변여과수, 지하수 등)에 따라 상수원 수질검사 항목 및 검사주기를 달리하고 있다. 오염원의 유입이 상대적으로 적을 것으로 예상되는 지하수의 경우에는 지표수에 비해 수질모니터링 항목 및 검사주기가 적게 설정되어 있다 (MOE, 2019).

K 정수장의 상수원은 강우시기에는 하천수의 수질 특성을 나타내고 있으나, 지하수 수질검사 항목에 대한 수질검사 및 모니터링을 실시하여 위해요소 관리에 취약성을 노출하였다. 집수구역내 농경지 및 주택지역이 다수 존재하여 강우기에 비점오염원에 기인한 다양한 오염물질이 유입될 가능성이 있으며, 비강우시에도 집수구역내 오염물질 누출, 투기 등의 사고에 대비한 관리체계가 미흡한 것으로 판단된다. 지하수로 분류된 상수원에 대해서는 분변성 오염지표인 대장균군에 대한 수질검사도 누락되어 있어 이에 대한 보완이 필요할 것으로 판단된다.

상수원수가 하천수일 경우에는 매월 6항목이상, 매분기 25항목이상의 수질검사를 실시하여야 하지만 K

정수장 상수원은 하천수의 특성을 갖고 있음에도 불구하고 지하수(용천수)로 상수원을 분류하여 반기 19개 항목에 대한 수질모니터링만을 실시하여 위해요소 관리에 취약성을 노출하였다. 따라서 K 정수장에서는 상수원을 지하수에서 하천수로 재분류하고 하천수에 해당하는 수질검사 항목에 대한 모니터링을 강화하여야 할 것으로 판단된다.

둘째, 상수원에 존재하는 위해요소의 경우 개별항목을 실시간으로 측정하기는 현실적으로 어려움이 있으므로 어류에 의한 수질감시수조, 물벼룩 등에 의한 생물감시장치 등의 도입이 필요하다. K 정수장과 같은 소규모 수도시설의 경우 물벼룩에 의한 생물감시장치 운영에 어려움이 발생할 수 있으므로 어류에 의한 수질감시수조가 추천될 수 있다.

K 정수장은 과거 어류관찰수조를 운영하였으나, 2018년 기준으로 운영관리 곤란 등의 이유로 운영하고 있지 않다. 따라서 오염물질 유입시 조기 확인이 어려운 상황으로 평가되므로, 상수원 수질오염사고의 신속한 인지 및 대응을 위해 어류관찰수조의 조속한 설치 및 연속적인 모니터링이 요구된다. 또한, 야간에는 어류관찰수조의 감시가 어려울 수 있으므로 웹카메라를 이용하여 중앙제어실에서 모니터링 할 수 있도록 설비를 구축하는 것이 바람직하다.

셋째, 정수처리 단위 공정별 수처리 효율 평가 및 수처리약품의 과소 또는 과다주입을 조기에 파악하기 위해서는 수처리 공정별로 수질자동측정기의 적절한 설치가 바람직하나 K 정수장의 경우 수질자동측정기의 설치가 일부 미흡한 것으로 파악된다. 수질자동측정기의 경우 Table 6과 같이 착수정, 여과지, 정수지, 배수지에 탁도, pH, 수온, 잔류염소계 등이 설치되어 있으나 상수원(취수지역)과 침전공정에는 설치가 전무한 실정으로 Table 7의 개선안과 같이 수질자동측정기의 신규 또는 이전 설치가 요구된다.

K 정수장은 취수구와 착수정이 인접하여 도수관로 길이는 260 m이고 도수관로 직경은 600 mm이다. 현재 취수구 주변에는 Table 6에 표시된 바와 같이 수질 연속측정기가 미설치되어 있고 착수정에는 설치가 되어 있는데 수질변동에 조속한 대응을 위해서는 Table 7과 같이 착수정에 설치된 탁도계, pH계를 취수구 주변으로 이전설치하고 이온물질 등의 종합적인 농도변화를 측정하기 위해 전기전도도계를 추가로 신규 설치하는 것이 바람직하다.



Table 6. Current location of on-line water quality analyzers at K WTP

Location	Thermometer	Turbidimeter	pH meter	Conductivity meter	Residual chlorine analyzer
Intake station					
Receiving well	○	○	○		
Sedimentation basin					
Filter basin		○			
Clearwell	○	○	○		○
Reservoir	○		○	○	○

Table 7. Recommended location of on-line water quality analyzers at K WTP

Location	Thermometer	Turbidimeter	pH meter	Conductivity meter	Residual chlorine analyzer
Intake station		◇	◇	◎	
Receiving well	○	□	□		
Sedimentation basin		◎	◎		
Filter basin		○			
Clearwell	○	○	○		○
Reservoir	○	◎	○	○	○

(○ : already installed, ◎ new installation, ◇ relocation, □ removal for relocation)

한편, 소독공정과 관련하여 K 정수장은 소독제로 고체형태의 차아염소산칼슘(Ca(OCl)₂)을 용해조에서 용해시킨 후 액상의 형태로 주입하고 있다. 그런데 용해과정에서 잔류염소 농도의 변동성이 크므로 소독제를 액상의 차아염소산나트륨(NaOCl)으로 바꾸는 것이 소독공정의 리스크 관리 측면에서 유리할 것으로 판단되었다.

4. 결 론

수돗물의 신뢰도 향상을 위한 한 방법으로 한국형 물안전계획의 도입이 제안되었다. 본 연구에서는 상수원유역-정수처리-수돗물공급-소비자에게 이르는 전과정(source to tap)에서 발생 가능한 150항목에 대해 위해요소 목록을 도출하고 위해요소의 발생빈도 및 예상 피해정도를 바탕으로 위해요소별 리스크를 평가할 수 있는 도구를 개발하였다.

본 연구를 통해 도출된 위해요소 및 위해요소 평가 도구를 시설용량 25,000 m³/d 규모의 K 정수장에 시범 적용한 결과 다음의 개선사항을 도출하였다. 우선, 상수원 수질모니터링 강화를 위해 수원의 분류를 당초

지하수에서 하천수로 변경하고 다음으로 취수원 수질의 신속한 감시를 위해 수질자동측정기의 설치 위치를 변경하며 독성물질 유입의 조기 감시를 위한 어류 관찰수조의 운영 및 염소소독 공정의 안정적인 운영을 위해 고체형태의 차아염소산칼슘을 액체형태의 차아염소산나트륨으로의 변경 등이 필요하다.

본 연구에서는 그동안 수도사업자별로 상이했던 상수도시설에 대한 위해요소 및 위해요소 리스크 평가 체계를 국내 실정에 맞게 제안하였다는 것도 의미가 있는 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 2019학년도 제주대학교 교원성과지원사업에 의하여 연구되었음. 본 연구는 환경부 “글로벌탐 환경기술개발사업(2016002120006)”으로 지원받았습니다.

References

Japan Ministry of Health, Labour and Welfare. (2008). *Guideline for Water Safe Plan.*

pp. 243-250

pp. 251-258

pp. 259-268

pp. 269-279

pp. 281-289

pp. 291-297

pp. 299-309

pp. 311-319

- Kim, J. (2012). Introduction of water safety plan in Korea, J. Korean. Soc. Water Wastewater, 26(4), 535-545.
- K-water. (2015). *WSP handbook for hazard inspection and evaluation* (internal data).
- KWWA(Korea Water and Wastewater Works Association). (2018). *Final report on Development of Korean WSP and Establishment of National Institutionalization Plan*.
- MOE(Ministry of environment). (2016). *Integrated national water supply plan*.
- MOE. (2019). www.moe.go.kr (March 04, 2019).
- Seoul Water Research Institute. (2017). *A study on WSP introduction in Seoul*, Seoul Water 7, 377-474.
- WHO. (2005). *Water Safety Plans*.
- WHO. (2008). *Guidelines for Drinking-water Quality*, 3rd Ed.
- WHO and IWA. (2009). *Water Safety Plan Manual*.
- Wikipedia. (2019). www.wikipedia.org (March 01, 2019).