



제주특별자치도 상수도 기후위기 적응대책 연구

A study on adaptation measures to climate crisis for water supply system of Jeju Special Self-Governing Province

김진근*
Jinkeun Kim*

제주대학교 환경공학과
Department of Environmental Engineering, Jeju National University

ABSTRACT

Risk assessment on Jeju Special Self-Governing Province(JSSGP)'s water supply facilities and establishment of adaptation measures for climate crisis factors were implemented. JSSGP's vulnerability to the climate crisis was high in the order of drought, heat wave, heavy rain and strong wind. As a drought adaptation measure, policies of water saving and revenue water ratio improvement were considered. As for the heat wave adaptation measure, the introduction of an advanced water treatment process was suggested in response to the increase of algae cell number which resulting in taste and odor problem. As for heavy rain adaptation measures, the installation and operation of automatic coagulant injection devices for water purification plants that take turbid surface water were proposed. As a measure to adapt to strong winds, stabilization of power supply such as installation of dual power line was proposed in preparation for power outages. It is expected that water facilities will be able to supply high-quality tap water to customers even under extreme climate conditions without interruption through risk assessment for climate crisis factors and active implementation of adaptation measures.

Key words: Climate crisis adaptation, Drought, Heat wave, Heavy rain, Water supply system

주제어: 기후위기적응, 가뭄, 폭염, 호우, 상수도

Received 15 November 2023, revised 13 December 2023, accepted 14 December 2023.

*Corresponding author: Jinkeun Kim (E-mail: kjinkeun@jejunu.ac.kr; Fax. 82-64-725-2483, Tel. 82-64-754-3448)

김진근 (교수) / Jinkeun Kim (Professor)

제주특별자치도 제주시 제주대학교로 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

2021년 8월, 기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)가 발표한 제6차 평가보고서(AR6 WG1)에 따르면, 현재 대기 중의 이산화탄소 농도는 최근 2백만 년간 가장 높은 수준이며, 이러한 전지구적 이산화탄소 농도의 상승은 기후변화를 야기한다 (MOE, 2023a).

전지구적인 기후변화의 영향력은 매우 광범위하게 나타나고 있다. 가뭄, 홍수 등은 지역별로 정도의 차이는 있으나 지속가능발전에 심각한 위협으로 작용하고 있어 기후변화에 기인한 여러 자연재해, 이상기후 등 악영향들로부터 자유로울 수 없고, 사람들의 생명과 재산을 보호하기 위해서는 온실가스 감축과 더불어 기후위기 적응이 필수적인 시대가 되었다.

온실가스 감축이란 기후변화를 완화 또는 지연시키기 위하여 온실가스 배출량을 줄이거나 흡수하는 모든 활동을 말하며, 기후위기 적응이란 기후위기에 대한 취약성을 줄이고 기후위기로 인한 건강피해와 자연재해에 대한 적응역량과 회복력을 높이는 등 현재 나타나고 있거나 미래에 나타날 것으로 예상되는 기후위기의 파급효과와 영향을 최소화하거나 유익한 기회로 촉진하는 모든 활동을 말한다 (MOE, 2023b).

기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법(약칭 : 탄소중립기본법)에서는 환경부 장관이 지정고시하는 공공기관은 기후위기 적응대책 수립을 법제화하고 있으며, 용수 분야에서는 제주특별자치도 상수도를 포함한 특광역시 상수도 등 11개 기관이 의무수립 대상이다 (MOE, 2023b).

상수도분야에서 기후위기 적응을 위해서는 양질의 취수원 확보와 안정된 물공급 시스템의 구축, 침수 방지, 물사용량 저감 및 관련 상수도시설의 취약성을 분석하고 개선방안을 수립하는 것이 필요하다. 특히 가뭄으로 인한 수량부족, 취수원 수질 저하 및 집중호우로 인한 수도시설 침수와 고탁도 원수의 유입 영향과 위험도는 기후위기 심화와 더불어 점증할 것으로 예상되므로 이에 대한 상수도시설의 대응능력 및 운영관리자의 전문성을 향상시키고 재정투자와 기술 및 정책지원, 교육 훈련 등이 필요하다.

이에 본 연구에서는 제주특별자치도 상수도에 대한 기후위기 취약성을 평가하고 기후위기 적응력 향상을

위한 계획을 제시하고자 한다.

2. 연구대상 및 방법

연구대상은 제주특별자치도내의 16개 정수장을 포함하는 취수-정수-송배수 시설이다. 제주특별자치도 본 섬에는 Table 1과 같이 16개소 정수장이 있으며, 2021년 기준 전체 상수도관로는 5,809.9 km이며, 이중 도수관이 75.5 km, 송수관이 501.5 km, 배수관이 1,955.2 km, 급수관이 3,277.7 km이며, 내용연수 기준 노후관은 895.7 km로서 전체 관로의 15.4% 수준이다 (JSSGP, 2022a; MOE, 2023c).

제주특별자치도의 상수원은 크게 심층지하수, 용천수, 하천수, 호소수로 구분할 수 있다. Table 1에서 정수방식의 분류중 소독만으로 구분된 9개 정수장(No. 1-9)은 지하 100-300 m 정도의 심도에서 지하수를 취수한 후 여과 등 별도의 정수처리 없이 현장제조염소를 이용한 소독처리만 실시하는 광역상수도 정수장이며, 이중 TP 정수장은 상수원 수질저하로 운휴중에 있다. 완속여과, 급속여과, 막여과시설로 분류된 7개 정수장(No. 10-16)은 용천수, 하천수, 호소수를 상수원으로 하며 정수처리공정은 취수-여과공정(완속/급속/막여과)-소독 공정으로 구성되어 있다. 심층지하수를 취수하는 광역상수도 상수원의 연중 수질은 미생물 항목을 제외한 대부분의 항목이 먹는물 수질기준을 항상 준수할 정도로 우수하나, 용천수 및 지표수를 취수하는 7개 정수장의 상수원수는 강수의 영향을 받아 일부시기에 탁도 상승이 관찰되고 있고 이러한 원수 수질특성을 고려하여 여과공정이 설치되어 있다 (JSSGP Water and Sewer Headquarters, 2023).

연구방법은 MOE (2022a)의 공공기관기후위기적응대책 수립지침에 근거하여 실시하였다. 기후위기 적응대책의 수립은 기초조사, 기후변화 영향 분석, 기후변화 위험도 평가, 우선순위 위험도 도출, 기후위기 적응 전략, 적응대책 세부시행계획 수립의 순서로 진행된다.

기후변화 위험도 평가는 3단계로 구성되는데, 1단계는 기후변화 위험 식별 및 규명이며, 2단계는 평가방법론에 따른 리스크 평가 실시이고, 3단계는 평가결과 취합 분석이다. 2단계에 적용되는 평가 방법론으로는 체크리스트를 활용한 위험도 평가, 위험지표를 활



Table 1. Water treatment plants(WTPs) in Jeju Special Self-Governing Province(JSSGP)

No.	WTP	Source	Water treatment process and capacity(m ³ /d)			
			Disinfection only	Slow filtration	Rapid filtration	Membrane
1	JC	Groundwater	37,000	-	-	-
2	KZ		19,000	-	-	-
3	EW		23,000	-	-	-
4	NW		37,000	-	-	-
5	TP		4,000	-	-	-
6	YS		32,000	-	-	-
7	KA		7,500	-	-	-
8	SK		32,500	-	-	-
9	HS		16,000	-	-	-
10	ES	Lake	-	15,000	-	-
11	WS	Spring+Stream	-	14,000	10,000	-
12	OR	Spring	-	-	15,000	-
13	BD		-	35,000	-	-
14	DR		-	10,000	-	-
15	HR		-	-	-	10,000
16	KJ	Stream	-	-	25,000	-

용한 위험도 평가, 공공기관차체개발 위험도 평가의 3 가지 방법을 제시하고 있다 (MOE and KEI, 2022). 인천광역시 및 울산광역시 상수도 기후위기 적응대책 수립시에는 체크리스트를 활용한 위험도 평가를 실시 하였으며(IMC, 2023; UMC, 2023), 본 연구에서도 기후위기에 따른 리스크 평가 체크리스트를 바탕으로 제주특별자치도 상수도부 재직자를 대상으로 상수도 시설의 취약성을 평가하고, 이를 바탕으로 기후위기 요소별 적응대책을 제시하는 형태로 추진하였다.

제주특별자치도 상수도시설에 부정적 영향을 미치는 기후위기의 상대적 중요도 도출을 위해 5대 기후요소(폭염, 한파, 호우, 대설, 강풍)와 더불어 가뭄, 해수면 상승 등 7개 요소에 대해 제주특별자치도 상수도부 및 13개 정수장(운휴 또는 무인운전중인 TP, KA, HS 정수장 제외) 재직자 전체 111명의 59%인 65명을 대상으로 체크리스트를 활용한 설문조사를 통해 시설물, 시설운영자, 공공서비스 3개 분야에 대한 기후위기 리스크를 점수화하여 리스크 점수가 높은 상위 30%의 요소에 대해 기후위기 적응대책을 제시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 제주특별자치도 기후현황 및 전망

제주도는 2006.7.1일 특별자치도로 출범한 이후 2023.10.31일 기준 2행정시 7개읍 5개면 31개동의 행정체계를 갖추고 있으며, 총면적은 1,850 km²이다. 제주특별자치도는 중앙에 표고 1,950 m 한라산을 정점으로 표고 200 m 이하를 해안저지대, 표고 200~600 m의 중산간지대, 600 m 이상을 산악지대로 구분하고 있다 (JSSGP, 2023).

제주특별자치도내 유인기상관측소 4개소에서 관측한 과거 50년(1973-2022)간의 연평균기온은 16.1°C이며, Fig. 1에 나타난 바와 같이 지속적으로 상승하는 것으로 분석된다. 연 평균기온 순위 분석결과 1위 2021년(17.2°C), 2위 1998년(16.8°C), 3위 2022년(16.7°C), 4위 2019년(16.6°C)으로 나타났으며, 역대 제주특별자치도 연 평균기온 순위를 살펴보면 상위 10위 내에 2000년 이후가 8번이나 포함되어 있어, 이는 기후변화로 인한 지속적인 기온상승 추세가 나타난 결과로 분석된다 (JRMA, 2023).

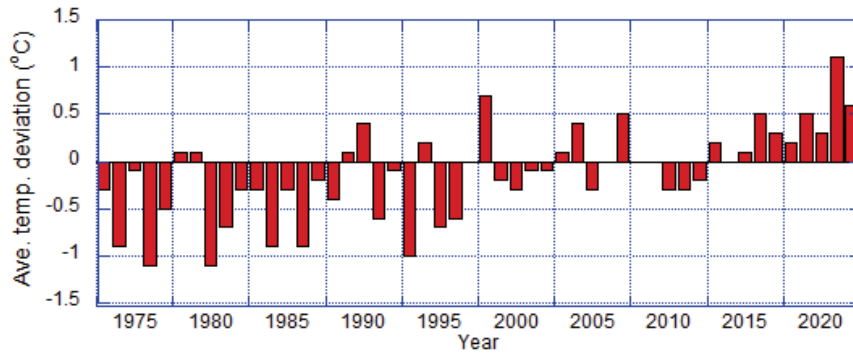


Fig. 1. JSSGP annual average temperature deviation.

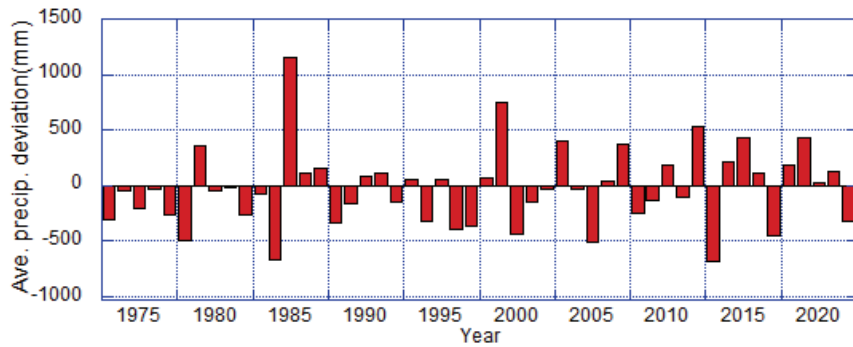


Fig. 2. JSSGP annual average precipitation deviation.

강수량의 경우 과거 50년(1973-2022)간의 연평균값은 1,676.2 mm이며, Fig. 2에서 강수량의 추세선을 분석한 결과 매우 완만한 상승세를 보이고 있으나, 경향성은 크지는 않은 것으로 분석된다.

온실가스 배출량을 저감하지 않고 현재 수준으로 배출하는 RCP 8.5 조건에서 제주특별자치도의 기후전망은 Table 2와 같다. 21세기 전반기(2021~2040)의 기후전망은 평균기온, 폭염일수, 폭우일수는 증가하고 대설일수 및 한파일수는 감소할 것으로 예상된다(JRI,

2022). 환경부와 한국환경연구원에서 정량화하여 제시한 2050 극한기후지수 값에서도 폭염 및 호우일수가 증가하는 것으로 예측되었다 (MOE and KEI, 2022).

3.2 기후위기 리스크 평가 및 우선순위 도출

기후요소별 취약성의 정성적 평가를 위해 제주특별자치도 상수도부 재직자 65명을 대상으로 기후요소별 제주특별자치도 상수도에 부정적 영향을 미치는 정도

Table 2. Current weather and future weather forecast of JSSGP(RCP 8.5)

	Year			
	2001~2010	2021~2040	2041~2070	2071~2100
Ave. temp.(°C)	14.4	15.1	16.5	18.2
Heat wave days(day)	1.7	4.1	13.0	29.5
Freezing days(day)	4.5	2.7	1.6	0.5
Cold wave days(day)	0	0	0	0
Precipitation(mm)	2168.9	2106.7	2075.9	2428.2
Heavy rain days(day)	4.7	5.9	4.9	7.2



를 5점(매우작다-1점, 약간작다-2점, 보통-3점, 약간크다-4점, 매우크다-5점) 척도로 조사하였다. 응답점수를 평균한 결과는 Table 3과 같이 가뭄(4.16), 한파(3.55), 대설(3.46), 호우(3.32), 폭염(3.27), 강풍(3.06), 해수면 상승(2.74)의 순으로 조사되어 가뭄이 가장 부정적인 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 상수도부 재직자의 경험을 바탕으로 요소별 가중치가 반영되어 나타난 결과로 평가된다. 설문결과를 바탕으로 한 기후위기 요소별 예상문제점 및 해당시설은 Table 4와 같다.

수도시설에 대한 리스크 평가는 수도시설이 위치한 지역의 기후영향요소 발생가능성(A)과 예상되는 피해영향의 크기(B)를 산정한 후, 이들의 값을 곱(A×B)하여 산출한다. A 값은 한국환경연구원에서 전국 기초

자치단체(시·군·구)에 대해 산출한 2050 극한기후지수 값을 적용하였다. 2050 극한기후지수는 RCP 8.5 조건에서 2045-2055년 평균 극한기후 발생 가능성을 시군구 단위로 1-5점 사이의 값으로 환산한 지표로서, 제주특별자치도의 경우 제주시와 서귀포시에 대한 값을 제시하고 있다.

제주특별자치도 수도시설별 기후위기 리스크 값을 나타내는 Table 5에서 평가 대상 14개 수도시설중 제주시에 위치한 11개소, 서귀포시에 위치한 3개소에는 각각 동일한 극한기후지수 값이 적용된다. B 값은 한국환경연구원 국가기후적응센터에서 제공하는 체크리스트를 활용한 설문조사를 통해 산정하였다. Table 6은 수도시설별 리스크 값을 기후요소별로 시설물, 시설관리자, 공공서비스로 구분하여 제시하고 있다.

Table 3. Relative vulnerability of climate factors in JSSGP

Climate factor	Number of negative response					Mean
	Very small	Slightly small	Ave.	Slightly big	Very big	
Drought	1	6	6	18	31	4.16
Cold wave	1	8	18	26	9	3.55
Heavy snow	2	9	20	19	11	3.46
Heavy rain	3	12	20	16	11	3.32
Heat wave	4	10	18	25	5	3.27
Strong wind	4	13	23	19	3	3.06
Sea level rise	13	16	13	12	7	2.74

Table 4. Expected problems by climate factors and applicable facilities in JSSGP

Climate factor	Anticipated problems	Applicable facilities
Drought	Lack of water intake	All water intake facilities especially in surface water sources
Heat wave	Increase in water usage	All water supply facilities
	Deterioration of tap water quality due to rising algae concentration(color, taste and odor)	Eoseungsaeng lake, Oedo stream, Kangjung stream
Heavy rain	Increase in turbidity	Oedo stream, Kangjung stream, Hanlim spring, Iho spring, Yongdam spring
	Flooding of facilities	Oedo intake station, Kangjung intake station, Ongpho intake station
Strong wind	Power outage	All water supply facilities
Heavy snow	Difficulty in inspecting facilities due to traffic disruption	Mid-mountain area facilities
Cold wave	Facilities freeze	Pipelines, water meters
Sea level rise	Increase in electrical conductivity	Yongdam 3rd spring

Table 5. Calculation of risk

WTPs	Likelihood(A)					Consequence(B)					Risk(A×B)				
	HW	CW	HR	HS	SW	HW	CW	HR	HS	SW	HW	CW	HR	HS	SW
HQ	1.87	1.00	1.38	1.08	1.16	2.57	2.52	2.53	2.35	2.58	4.81	2.52	3.49	2.54	2.99
JC	1.87	1.00	1.38	1.08	1.16	2.64	2.71	2.69	3.28	2.92	4.93	2.71	3.72	3.54	3.38
KZ	1.87	1.00	1.38	1.08	1.16	2.59	2.10	2.41	2.50	2.43	4.85	2.10	3.32	2.70	2.82
EW	1.87	1.00	1.38	1.08	1.16	2.48	2.48	2.34	2.21	2.51	4.64	2.48	3.23	2.39	2.91
NW	1.72	1.00	1.44	1.02	1.04	2.79	2.80	3.00	3.00	2.92	4.80	2.80	4.32	3.06	3.03
YS	1.87	1.00	1.38	1.08	1.16	2.40	1.33	2.00	2.26	1.75	4.48	1.33	2.76	2.44	2.03
SK	1.72	1.00	1.44	1.02	1.04	2.15	2.64	1.99	2.34	2.44	3.70	2.64	2.87	2.39	2.53
ES	1.87	1.00	1.38	1.08	1.16	2.30	2.46	2.37	2.40	2.36	4.30	2.46	3.28	2.60	2.74
WS	1.87	1.00	1.38	1.08	1.16	3.33	3.31	3.26	3.51	3.57	6.23	3.31	4.50	3.79	4.14
OR	1.87	1.00	1.38	1.08	1.16	3.27	2.65	2.60	3.78	3.68	6.11	2.65	3.59	4.08	4.27
BD	1.87	1.00	1.38	1.08	1.16	1.00	2.50	3.11	1.00	3.00	1.87	2.50	4.30	1.08	3.48
DR	1.87	1.00	1.38	1.08	1.16	2.29	2.29	2.40	2.30	2.30	4.28	2.29	3.31	2.48	2.66
HR	1.87	1.00	1.38	1.08	1.16	2.81	3.00	2.41	3.00	3.00	5.25	3.00	3.33	3.24	3.48
KJ	1.72	1.00	1.44	1.02	1.04	3.21	3.29	2.92	3.31	3.09	5.52	3.29	4.21	3.37	3.21

* HQ : Headquarter, HW : Heat wave, CW : Cold wave, HR : Heavy rain, HS : Heavy snow, SW : Strong wind

Table 6. Risk assessment by climate factors

Climate factor	Classification	WTPs													
		HQ	JC	KZ	EW	NW	YS	SK	ES	WS	OR	BD	DR	HR	KJ
HW	Facility	4.94	5.47	5.70	5.04	5.05	4.72	3.39	4.27	6.66	7.11	1.87	4.36	4.54	5.73
	Operator	4.69	5.04	3.82	4.21	4.20	4.36	4.06	4.34	6.23	5.61	1.87	4.10	5.61	5.71
	Public service	4.80	4.47	4.36	4.68	4.59	4.36	3.63	4.30	5.80	5.61	1.87	4.36	5.61	5.12
CW	Facility	2.52	3.02	2.99	2.44	2.58	1.33	2.67	2.33	3.34	2.91	1.50	2.33	3.00	3.29
	Operator	2.61	2.31	1.83	2.83	2.83	1.33	3.08	2.39	3.25	2.54	3.00	2.19	3.00	3.39
	Public service	2.44	2.44	2.42	2.17	3.00	1.33	2.39	1.33	3.33	2.50	3.00	2.33	3.00	3.19
HR	Facility	3.45	3.48	4.10	3.14	4.32	2.76	3.92	3.01	4.33	3.57	4.55	3.22	3.55	3.94
	Operator	3.64	3.99	3.91	3.22	4.32	2.76	2.88	3.14	4.81	3.53	4.14	3.48	3.45	4.50
	Public service	3.38	3.68	3.68	3.34	4.32	2.76	3.36	3.68	4.37	3.68	4.14	3.22	2.99	4.18
HS	Facility	2.52	3.24	3.24	2.30	3.06	2.28	2.40	2.51	3.96	4.32	1.08	2.52	3.24	3.37
	Operator	2.72	3.96	2.16	2.52	3.06	2.52	2.38	2.64	3.72	3.60	1.08	2.40	3.24	3.63
	Public service	2.38	3.42	2.70	2.34	3.06	2.52	2.38	2.64	3.71	4.32	1.08	2.52	3.24	3.17
SW	Facility	3.01	3.19	2.92	2.71	3.12	2.21	2.58	2.64	4.29	4.31	3.48	2.71	3.48	3.19
	Operator	3.07	3.48	2.51	3.03	3.12	1.93	2.43	2.84	4.20	3.87	3.48	2.58	3.48	3.33
	Public service	2.90	3.48	2.80	3.00	3.12	1.93	2.60	2.75	3.94	4.64	3.48	2.71	3.48	3.12



3.3 기후위기 적응대책

제주특별자치도 상수도시설의 기후위기 적응대책 수립의 우선순위는 Table 3의 기후위기 요소별 취약성 평가결과와 Table 6의 리스크 평가 결과를 종합하여 가뭄, 폭염, 호우, 강풍 순으로 선정하였다. 한파발생일수는 현재 및 미래 전망값도 0이며, 대설의 경우 제주특별자치도의 온화한 기후로 대부분 1-2일 내에 용설되는 지역적 특성을 고려하여 우선순위에서 제외하였다.

3.3.1 가뭄

취수원이 고갈되어 발생하는 가뭄과 관련한 지속가능한 적응 대책은 물사용량을 줄이는 수요관리 정책을 우선적으로 추진하는 것이 바람직하다. 즉, 신규수자원의 확보보다는 수요관리를 통한 물 사용량 억제, 누수복구를 통한 새는물 저감 정책이 우선되어야 할 것으로 판단된다.

물 사용량 억제를 위해서 물 절약 교육 홍보와 더불어 절수설비 및 절수기기의 설치 확대가 중요하다. 최근 절수설비 기준의 강화에 따라서 이의 설치를 확대하기 위한 조례 강화 등이 필요하다. 제주특별자치도에서는 2021년 12월 31일부터 절수설비 등 설치촉진에 관한 조례를 시행중이나, 설치대상으로 수도법에 규정한 대상외에는 구체적으로 명시하지 않고 도지사가 특히 필요하다고 인정하는 시설로만 대상을 한정하여 실효성이 낮은 편이다. 한편, 서울특별시 서초구 등에서는 운영중인 조례에는 절수설비 설치 대상을 수도법에 규정한 대상에 추가하여, 구가 관리하는 공공시설, 주민센터, 출자·출연 기관 등을 명시하고 있어(Seocho-Gu Council, 2023), 제주도 조례에서도 절수설비 설치 대상을 구체화하고 확대하려는 노력이 필요하다. 1회 사용수량이 4 L 이하인 1등급 절수형 변기가 전국에 약 2,300만대 보급(기존 6L 변기를 4L 변기로 대체)될 경우 연간 약 1억 5,000만톤의 수돗물을 절약할 수 있으며, 이는 인구 115만 명에 이르는 광역시 규모의 도시에서 1년 동안 사용하는 양과 유사한 수준으로, 수돗물 평균 생산원가를 적용할 경우 연간 약 1,490억 원의 비용 절감이 가능(2022년 기준)할 것으로 판단된다 (MOE, 2022b).

Fig. 3은 2007년부터 2021년까지 국내 및 제주도의 1인당1일물사용량(lpcd)을 나타낸다. 2011년까지 제주

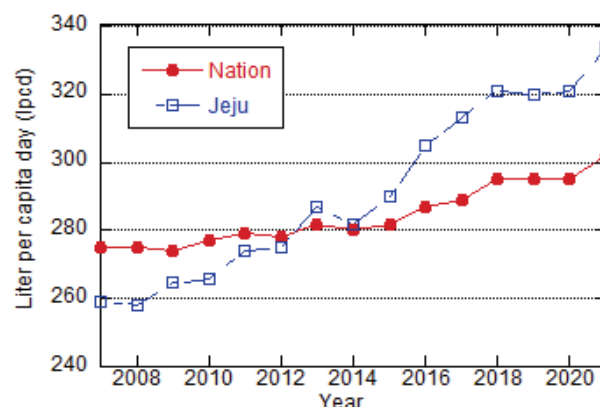


Fig. 3. Tap water usage of national average and JSSGP.

도의 lpcd는 전국 평균보다 낮았으나, 2012년부터 지속적으로 증가하여 2021년 제주도의 lpcd는 전국 평균 302 L보다 11.1% 높은 334 L를 나타내고 있다 (MOE, 2023c). Fig. 3에서 연평균 lpcd의 증가율은 전국 평균이 0.68%인데 비해서 제주특별자치도는 1.85%로 나타나서 전국 평균 대비 2.7배 높은 수준이다. 따라서, 물 사용량을 줄이기 위한 보다 적극적인 시민의 참여 및 행정당국의 조치가 필요하다. 높은 lpcd는 상수원 고갈 등 가뭄에 취약하며, 하수도 배출량 증가에 따른 공공하수처리시설 대응능력 저하 등 다양한 문제를 야기할 수 있다. Lpcd를 낮추기 위해서는 물 수요관리를 위한 관련 법제도의 정비, 지자체 조례 제정 및 강화를 통한 절수설비의 설치 확대, 물 절약 교육 및 홍보 등이 필요하다.

물 공급 능력 강화를 위해서는 우선 누수 저감, 지역적 물 공급 균등화를 위한 수돗물 공급 연계체계 구축 등을 고려할 수 있다. 제주특별자치도에서도 수돗물 공급능력 증가를 위해서는 신규 관정개발은 최소화하고 전국 최저수준인 유수율 향상을 위한 적극적인 노력이 필요하다. 전국 및 제주도의 유수율을 나타내는 Fig. 4에서 제주특별자치도는 2021년 기준 유수율이 51.8%로 전국 평균 유수율(85.9%)의 60.3% 수준이다. 제주특별자치도에서는 2016년부터 유수율 제고 사업을 적극적으로 추진하고 있으나, 2016년부터 2021년까지의 유수율 증가는 연간 1.22%p로서 현재와 같은 추세를 유지할 경우 전국 평균 수준인 유수율 85%를 달성하는 데는 약 27년이 소요될 것으로 추산된다. 따라서 유수율 향상을 위한 행정당국의 보다 적극적인 대처가 필요하다. 2021년 기준 51.8%인 유수

pp. 311-324
pp. 325-334
pp. 335-345
pp. 347-361
pp. 363-373
pp. 375-382
pp. 383-394
pp. 395-408
pp. 409-423
pp. 425-435
pp. 437-446
pp. 447-456

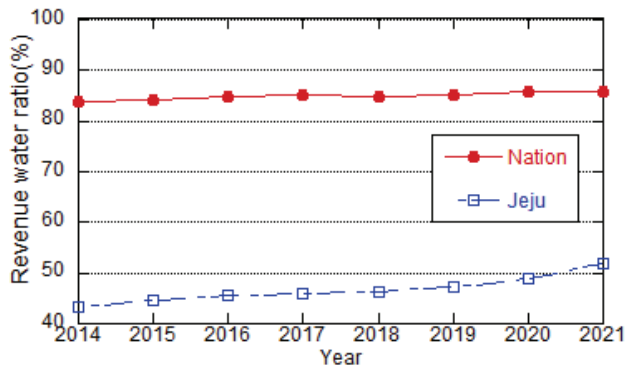


Fig. 4. Revenue water ratio of national average and JSSGP.

율을 85% 수준으로 향상할 경우 수돗물 생산량 절감 효과는 176천 m³/일로서 이에 따른 수돗물 생산비용 절감 효과 및 지하수 관정개발 등 상수도기발시설 개발 비용 절감효과는 연간 3,313억원에 이를 것으로 추정된다 (JSSGP, 2022b).

Table 1에서 광역상수도 9개 정수장(No. 1-9)은 심층지하수를 취수하고 있어, 시설가동 후에 가뭄으로 인한 취수량 저감 사례는 발생되지 않았으나, 지표수 또는 용천수를 상수원으로 하는 7개 정수장(No. 10-16)은 가뭄발생시 취수량의 급격한 감소가 확인되었다. 특히 ES 정수장의 경우 2013년, 2017년 여름에 각각 18일과 35일간 제한급수 사례가 발생하였다 (JSSGP, 2018). ES 정수장을 제외한 15개 정수장의 송배수 관로는 연계운영이 가능하여 지표수 및 용천수 취수시설에서 가뭄으로 취수량이 부족할 경우 심층지하수를 취수하는 정수장에서 취수량을 증가시켜 연계된 송배수 관로를 이용하여 일정부분 대응이 가능하다. 그러나 ES 정수장 송배수 관로는 다른 정수장의 송배수 관로와의 연계율이 2% 수준으로 가뭄에 매우 취약한 실정이다 (JSSGP, 2022a).

3.3.2 폭염

폭염은 수돗물 사용량 증가, 지표수 수온 증가에 따른 조류 개체수 증가 및 조류 기인 이취미 발생 등 상수원수 수질저하를 유발할 수 있다. 용천수 및 심층지하수는 수온상승의 가능성은 상대적으로 작으나, 일부 하천수 및 호소수의 경우에는 폭염에 기인한 수온상승이 예상되며, 이는 조류개체수 증가에 영향을 줄 수 있다. 한라산국립공원내 해발 600 m 정도에 위치

한 ES 수원지에서도 하절기 조류 개체수 증가 및 이로 인한 색도 증가가 관찰되었다 (Lee et al., 2016; Lee and Kim, 2017). 또한 취수보를 설치하고 하천수를 취수하는 OD천 및 KG천에서도 조류 개체수 증가와 이로 인한 이취미 발생이 보고되었다 (Jejuilbo, 2019). 수돗물에서 이취미 발생을 저감하기 위해서는 상수원으로 유입되는 오염원 저감을 위한 노력과 더불어 정수처리 과정에서 오존산화, 활성탄 흡착 공정 등의 고도정수처리공정 도입을 통한 대처가 필요하다. 합리적인 고도정수처리공정의 도입을 위해서는 다년간의 수질모니터링, pilot plant 실험 등을 통한 최적 공정 및 설계인자 도출 등의 절차가 필요하다.

3.3.3 호우

호우로 예상되는 피해는 시설물 침수와 고탁도 원수의 유입이다. Table 1에서 용천수, 하천수, 호소수를 취수하는 ES, WS, KJ 등은 집중호우 발생시에 원수 탁도가 2 NTU를 상회하기도 한다. 다른 정수장과 송배수관로 연계가 거의 안된 ES 정수장과는 달리 지표수를 취수하는 WS, OR, HR, KJ 정수장의 경우 집중호우로 인한 고탁도 발생시에는 짧게는 수시간에서 길게는 1일 이상 취수를 중단하거나 취수량을 줄이고 부족한 수량은 인근의 심층지하수를 취수하여 공급하는 정수장의 취수량을 늘리고 연계관로를 활용하여 용수를 공급하고 있어 이에 대한 개선이 필요하다.

급속여과시스템을 갖춘 육지부 정수장에서는 상수원의 탁도가 500 NTU를 상회하여도 적정 응집, 침전, 여과 공정을 거쳐서 양질의 수돗물을 생산 공급하고 있음에도 불구하고, 제주도에서는 원수 탁도가 2 NTU 정도를 상회할 경우에는 취수 중단 또는 취수량 감소로 대응한다. 실제 용천수 및 지표수를 취수하는 7개 정수장에는 응집제 주입설비가 제대로 설치되지 않았으며, 2020년 KG천에서 취수하는 KG 정수장에 도내 최초로 응집제 자동주입 장치가 설치되어 운영중이다. 따라서 집중호우시에 원수 탁도 상승이 관찰되는 4개 정수장에 대해서는 응집제 자동주입 장치의 설치를 통한 탁도 물질의 적정 응집처리가 필요하다.

Table 2에서 제주특별자치도 기후전망의 주요 특징은 폭염과 호우일수의 증가이다. 호우일수의 증가는



Table 7. Plans and budget for adaptation to climate crisis

Climate factor	Adaptation plan	Applicable facilities	Budget (10 ⁶ ₩)
Drought	Increase of revenue water rate	All facilities	*
	Emergency connection to the water pipeline	JC, EW	*
	Reduce tap water use	All facilities	*
Heat wave	A feasibility study and pilot plant operation for the introduction of advanced water treatment facilities	ES, WS, KG	3,000
Heavy rain	Installation of automatic coagulant injection facilities	WS, OR, ES, HR	800
Strong wind	A feasibility study for installation of power supply duplexing facilities	All facilities	100

* The budget is already included in the Jeju Special Self-Governing Province waterworks maintenance plan established in 2022.

용천수 및 지표수를 이용하는 상수원에서 원수 탁도 상승을 의미한다. 지표수 및 용천수 취수 수도시설에서 호우에 대한 적응능력 향상을 위해서는 호우 발생 시에도 취수중단 또는 취수량 감량 없이 안정적인 정수처리가 필요하며, 이를 위해 응집제 자동주입 장치의 도입 및 운영을 통한 응집공정의 최적화가 필요하다.

3.3.4 강풍

삼다도로 알려진 제주특별자치도는 태풍의 길목으로 과거부터 강풍의 피해가 다수 발생하였다. 태풍은 호우를 동반하는 특성상 피해가 가중되는 특징이 있다. 대부분의 수도관이 지하에 매설되어 있고, 제주도의 정수시설도 대부분 소독만의 처리, 완속여과, 급속여과 등 육지부에 비해 상대적으로 단순시설로 구성되어 시설물의 전도 등 강풍에 의한 직접적인 피해는 상대적으로 적으나 가장 큰 피해는 강풍으로 인한 정전에 기인한 단수발생이다. 대표적인 사례로는 2020.09.02.일 태풍 마이삭으로 인한 강풍으로 도내 3만6천886가구가 정전이 발생하였고, 이로 인한 단수도 다수 발생하였다. 2012.08.28.일에는 태풍 볼라벤의 영향으로 도내에서 대규모 정전이 발생하였는데, 특히 WS 정수장에 정전이 발생하면서 일대 수도물 단수가 발생하였다.

정전에 의한 수도물 공급중단을 최소화하기 위해서는 전력공급체계의 안정화가 필요하다. 안정적인 전력 수전을 위하여 수도시설에 유입되는 한전 선로를 상용회선과 예비회선으로 복선화하는 것이 바람직하

나 상대적으로 중요도가 낮은 시설은 한국전력공사의 배전계통에 문제가 있거나 예비회선 수전용 선로공사비가 현저히 높을 경우에는 1회선 수전을 하고 비상발전기를 설치할 수도 있다.

전원공급체계 안정화 방법은 1회선 수전방식+비상발전기 형식과, 2회선 수전방식(동일변전소 수전 및 다른 변전소 수전 방식으로 구분 가능)으로 구분할 수 있다. 이 경우 수도시설의 특성과 인근 전기사업자의 변전소 및 배전선로 위치 등을 고려하여 경제성, 전력수급의 안전성, 운영관리의 편리성 등을 종합적으로 검토하여 최적의 전력 공급 방안을 선정하는 것이 바람직하다. 2회선 수전시에는 수전측에 자동부하전환개폐기(ALTS, automatic load transfer switch)를 설치하여 상용전원 정전시 예비전원으로 자동 전환되어 부하설비가 정전 없이 운전이 가능하도록 하여야 한다.

기후위기 요소별 주요 적응대책 및 소요예산은 Table 7과 같다.

4. 결 론

환경부에서 제시하는 폭염, 한파, 호우, 대설, 강풍의 5대 기후위기요소와 가뭄, 해수면 상승을 포함한 7대 기후위기 요소에 대해 제주특별자치도 상수도에 대한 리스크를 평가하고 리스크 저감을 위한 적응대책을 수립하였다.

제주특별자치도 상수도의 기후위기에 대한 취약성은 가뭄, 폭염, 호우, 강풍 순으로 높게 나타났으며 이에 대한 세부 적응대책을 제시하였다.

pp. 311-324 pp. 325-334 pp. 335-345 pp. 347-361 pp. 363-373 pp. 375-382 pp. 383-394 pp. 395-408 pp. 409-423 pp. 425-435 pp. 437-446 pp. 447-456

가뭄적응대책으로는 수요관리 측면에서는 절수 정책, 공급관리측면에서는 우수율 향상 정책이 우선적으로 필요한 것으로 판단된다. 폭염적응대책으로는 물사용량 증가에 대비한 물수요관리 정책과 조류개체수 증가와 이로 인한 이취미 발생에 대응하여 고도정수처리공정 도입이 제시되었다. 호우적응대책으로는 시설물 침수예방대책과 고탁도원수 유입에 대응하여 지표수를 취수하는 정수장에 대한 응집제 자동주입장치 설치 및 운영이 제시되었다. 강풍적응대책으로는 정전에 대비하여 2회전 수전 등 전력공급안정화 방안이 제시되었다.

기후위기로소에 대한 리스크 평가 및 리크스 저감을 위한 적응대책의 적극적 실행을 통해 극한 기후조건에서도 고품질의 수돗물을 중단 없이 고객에게 공급할 수 있는 수도시설의 역량이 강화될 것으로 기대된다.

사 사

이 논문은 2023학년도 제주대학교 교원성과지원사업에 의하여 연구되었음.

References

- Incheon Metropolitan City(IMC). (2023). Incheon Metropolitan City waterworks climate crisis adaptation measures.
- JRI(Jeju Research Institute). (2022). *Jeju Special Self-Governing Province climate crisis adaptation plans*.
- JRMA(Jeju Regional Meteorological Administration). (2023). www.kma.go.kr/jeju (October 20, 2023).
- JSSGP(Jeju Special Self-Governing Province). (2023). *2022 statistical year book*.
- JSSGP. (2022a). *JSSGP waterworks maintenance plan*.
- JSSGP. (2022b). Internal report..
- JSSGP. (2018). *60 years history of Jeju waterworks development*.
- JSSGP Water and Sewer Headquarters. (2023). www.jeju.go.kr/jejuwater (November 01, 2023).
- Jejuilbo(newspaper), 2019.05.16.
- Lee, J., Lee, H. and Kim, J. (2016). Analysis of chromaticity cause in Jeju Eoseungsaeng Lake, J. Korean Soc. Water Wastewater, 30(4) 381-389.
- Lee, J. and Kim, J. (2017). Chromaticity removal by chlorine and ozone oxidation in water treatment, J. Korean Soc. Water and Wastewater, 31(4) 273-279.
- MOE(Ministry of environment). (2023a). *2022 White paper of environment*.
- MOE. (2023b). *Act on carbon neutrality and green growth to respond to the climate crisis*.
- MOE. (2023c). *2021 Waterworks statistics*.
- MOE. (2022a). Guidelines for establishing climate crisis adaptation measures in public institutions.
- MOE. (2022b). Press release (April 14, 2022).
- MOE and KEI(Korea Environment Institute). (2022). *Educational materials on the establishment of adaptation measures to climate crisis in public institutions*.
- Seocho-Gu council. (2023). www.sdc.seoul.kr (November 10, 2023).
- Ulsan Metropolitan City(UMC). (2023). Ulsan Metropolitan City waterworks climate crisis adaptation measures.