



제주도 기후변화 관련 상수도시설 취약성 평가 및 적응대책

Water utilities vulnerability assessment and adaption strategies for climate change in Jeju province

김진근
Jinkeun Kim

제주대학교 환경공학과, 제주특별자치도 제주시 제주대학로 102, 63243
Jeju National University Department of Environmental Engineering, Jeju-do Jeju-si Jejudaehak-ro 102, 63243

pp. 479-485

pp. 487-497

pp. 499-505

pp. 507-515

pp. 517-526

pp. 527-533

pp. 535-550

pp. 551-557

pp. 559-572

pp. 573-581

ABSTRACT

Climate adaptation strategies for water utilities including 16 water treatment plants(WTPs) in Jeju were investigated. Drought, heat wave, and heavy rain were among the most significant climate factors affecting water utilities in Jeju. Heat wave increases water temperature, which in turn increases the concentration of algae, color, and odor materials. Some adaption strategies for the heat wave can be strengthening water monitoring and introducing advanced water treatments. Heavy rain increases raw water turbidity in surface water. The 7 WTPs that take raw water from streams or springs had a maximum turbidity of less than 50 NTU under heavy rain. However, due to concerns of turbidity spike in treated water, some WTPs discontinued intaking raw water when raw water turbidity increased more than 2 NTU. They instead received treated water from other WTPs which took groundwater for water supply. This happens because of the low skills of employees. Thus, there needs to be an increase in operator competency and upgrade of water facilities for the adaption of heavy rain. To improve adaption for the drought, there should be an increase in the capacity of intake facilities of surface water as well as a decrease in water loss. In addition, water consumption per person should be decreased.

Key words: Adaptation strategy, Climate change, Drought, Heat wave, Water utility

주제어: 적응전략, 기후변화, 가뭄, 폭염, 상수도시설

1. 서론

급속한 산업화, 도시화 과정에서 다량 배출된 온실 가스는 폭염, 호우, 가뭄과 같은 이상기후 현상의 주요 원인이 되고 있다. 전 세계적으로 온실가스를 감축하기 위해 많은 노력을 펼치고 있지만 여전히 온실가스 배출량은 증가 추세에 있으며 과거에 배출된 많은 양의 온실

가스 때문에 지구온난화 및 이상기후 현상은 당분간 지속될 것으로 전망된다.

전 지구적으로 현재와 같은 온실가스 배출 추세를 유지할 경우, 21세기 후반기(2071~2100) 한반도 연평균 기온은 1981~2010년보다 5.3°C 상승할 것으로 전망되며 연평균 강수량은 17.6% 증가하여 1,366.9 mm로 예상된다 (MOE, 2018a).

현재의 가뭄, 호우 등과 같은 기후변화에 의한 영향은 우리가 아무리 강력한 온실가스 감축정책을 시행한다

Received 13 August 2018, revised 19 November 2018, accepted 20 November 2018.
*Corresponding author: Jinkeun Kim (E-mail: kjinkeun@jejunu.ac.kr)

고 하여도 이미 배출된 온실가스로 인해 피할 수 없는 부분이 있다. 따라서 이미 일어난 또는 미래에 발생할 것으로 예측되는 기후변화에 대처하여 부정적 영향을 최소화하려는 노력이 필요하며, 이러한 노력을 종합적으로 기후변화 적응이라고 표현할 수 있다. 기후변화 적응과정을 통해 기후변화의 부정적 위험은 감소되고 오히려 기후변화가 유익한 기회로 활용될 수 있으며, 미래 기후변화에 따른 각 부문별 영향이 적응 유무에 따라 변화될 수도 있다. 이제는 기후변화에 기인한 여러 자연재해, 이상기후 등 악영향들로부터 자유로울 수 없고 기후변화 적응이 필수적인 시대가 되었다 (Yoo, 2009).

수돗물 소비자는 고품질의 수돗물을 중단 없이 공급받기를 원하고 있다. 국민들이 요구하는 안전한 물의 안정적인 공급을 위해서는 취수원부터 수도꼭지까지 상수도 전 과정에 대해 가뭄, 폭염, 호우 등의 기후변화에 대한 민감도, 잠재적 영향, 적응능력 등에 대한 취약성을 평가하고 기후변화 대응력 향상을 위한 종합적인 적응대책 수립이 필수적이다.

본 연구에서는 상수도분야 기후변화 적응과 관련된 국내외 현황조사 및 분석을 통해 제주특별자치도의 수돗물 생산 및 공급체계에 대한 기후변화 취약성을 평가하고 상수도 시스템 전 과정에서의 기후변화 대응력 향상을 위한 개선방안을 제시하고자 한다.

2. 연구대상 및 방법

일반적인 기후변화 적응대책 수립 절차는 Fig. 1과 같이 크게 5단계로 구분할 수 있다. 1단계는 예상되는 기후변화의 영향 및 도전에 대한 이해, 2단계는 고장 또는 피해의 한계점 인식, 3단계는 리스크 평가, 4단계는 적응대책 옵션 결정, 5단계는 실행 및 점검으로 구분된다 (USEPA 2015).

제주특별자치도는 2016년 12월 31일 기준 2개시 7개 읍 5개면 31개동의 행정체계를 갖추고 있다. 총면적은 1,849.15 km²이고 중심부에 한라산(1,950 m)이 위치하여 단면상으로 원추형이며 동·서사면은 3~5도, 남·북사면은 5도 정도의 경사가 나타난다 (JSSGP, 2017a).

온실가스 배출량을 저감하지 않고 현재 수준으로 배출하는 조건에서 제주특별자치도의 21세기 후반기(2071~2100) 평균 기온은 현재 기후값보다 4.6°C 상승하여 약 19.0°C가 될 것으로 전망된다. 연평균 강수량은 현재 기후값인 2,168.1 mm에서 34.9% 증가되어 2,924.5 mm로

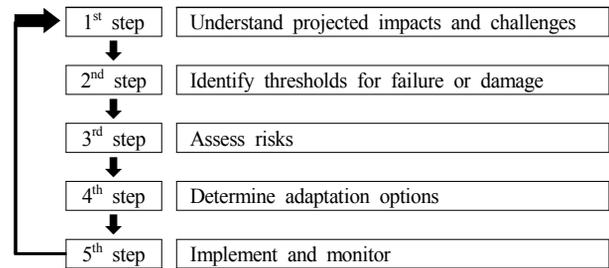


Fig. 1. General process steps for adaptation planning.

예상되고, 일강수량 80 mm 이상으로 정의되는 호우일수는 현재 기후값인 4.7일 대비 202.1%가 증가되어 14.2일로 예상되며, 강우강도는 현재 기후값 19.4 mm/일 대비 28.9% 증가한 25.0 mm/일이 될 것으로 예상된다 (KMA, 2013).

연구대상은 제주특별자치도내의 취수-정수-송배수와 관련된 상수도시설이다. 정수장은 Table 1에 표시된 바와 같이 16개소가 있으며 총 정수처리 시설용량은 357,000 m³/day 이다. 제주특별자치도의 상수원은 크게 용천수 및 용천수 영향을 받는 하천수, 호소수, 심층지하수로 구분할 수 있다. 용천수 또는 용천수 영향을 받는 하천수를 취수하는 6개 정수장(Table 1에서 No. 1-6)은 완속여과 또는 급속여과공정에서 탁도유발물질을 제거하고 차아염소산나트륨(NaOCl) 또는 차아염소산칼슘(Ca(OCl)₂)을 이용한 염소소독 공정을 거친 후 용수를 공급하고 있으며 용천수를 취수하는 HR 정수장(No. 4)은 원수내 질산성질소 제거를 위해 급속여과후 NF 공정을 거쳐 염소 소독후 용수를 공급하고 있다. 호소수를 취수하는 ES 정수장(No. 7)은 취수-응집-급속여과-완속여과-소독 공정을 통해 정수처리를 하고 있다. 한편, 심층지하수를 상수원으로 하는 9개 정수장은 1996년에 1단계 5개소(No. 8-12), 2008년에 2단계 4개소(No. 13-16)가 준공되었으며 취수 후 염소소독처리만 실시하고 용수를 공급하고 있다 (JSSGP, 2018a).

주요 연구는 기후영향요소별로 제주특별자치도 상수도 시설의 취약성 평가 및 이에 대한 적응대책을 제시하는 형태로 실시되었다. 기후변화 취약성이란 지구, 생물, 사회경제 등의 시스템이 기후변화에 의한 부정적 효과에 대해 얼마나 견딜 수 있을지의 정도를 나타내는 용어이며, 다음 식으로 정량화할 수 있다 (KACCC, 2018; Park et al., 2017).

$$\text{취약성} = (\alpha \times \text{기후노출도} + \beta \times \text{민감도}) - \gamma \times \text{적응능력} \quad (1)$$



Table 1. Water treatment plants(WTPs) in Jeju Province

(unit : m³/d)

No.	WTP	Source	Capacity	Water Treatment Process			
				Disinfection Only	Slow Filtration	Rapid Filtration	Membrane
	Sum	-	357,0000	223,000	55,000	69,000	10,000
1	OR	Spring	15,000	-	-	15,000	-
2	BD		35,000	-	35,000	-	-
3	DR		10,000	-	10,000	-	-
4	HR		10,000	-	-	-	10,000
5	WS	Spring+Stream	24,000	-	10,000	14,000	-
6	KJ	Stream	25,000	-	-	25,000	-
7	ES	Lake	15,000	-	-	15,000	-
8	EW	Groundwater (1st stage)	23,000	23,000	-	-	-
9	JC		37,000	37,000	-	-	-
10	KZ		19,000	19,000	-	-	-
11	TP		19,000	19,000	-	-	-
12	NW		37,000	37,000	-	-	-
13	KZ	Groundwater (2nd stage)	7,500	7,500	-	-	-
14	YS		32,000	32,000	-	-	-
15	HS		16,000	16,000	-	-	-
16	SW		32,500	32,500	-	-	-

기후노출도는 시스템이 기후와 관련된 자극에 어느 정도 노출되었는지를 의미한다. 기온, 강수량, 상대습도와 같은 기후요소 혹은 기후요소에 기반한 지수로 구성된다. 민감도는 시스템이 해당 기후노출도에 얼마나 민감한지를 나타내며, 보통 분석하고자 하는 취약대상의 수, 밀도 등으로 구성된다. 일반적으로 기후변화 영향은 기후노출도와 민감도를 합한 값으로 표현될 수 있다.

적응능력은 시스템이 기후변동, 극한 기후현상에 관한 결과를 조절하고 잠재적인 피해를 완화하며 결과에 대처하는 정도로서 지역 내 정수장 및 배수지 용량 등으로 구성될 수 있다. α,β,γ는 각 요소에 대한 가중치로서 총합은 1이 되어야 하며, 취약성 평가항목에 따라 비중이 달라질 수 있다 (Park et al., 2017).

기후요소별 취약성 평가는 정성적 평가와 정량적 평가로 구분하여 실시되었다. 우선, 정성적 평가를 위해 국가기후변화적응센터에서 제시하는 5대 기후영향요소인 폭염, 한파, 호우, 대설, 강풍과 더불어 가뭄, 해수면 상승 등 7개 요소에 대해 제주특별자치도 상수도본부 공무원 21명을 대상으로 상수도시설에 부정적 영향을 미치는 기후영향요소의 상대적 중요도에 대한 인식도 조사를 실시하였다.

이를 바탕으로 제주특별자치도 상수도시설에 미치는 영향이 큰 것으로 파악되는 가뭄, 폭염, 호우에 대하여 국가기후변화적응센터에서 개발한 VESTAP(vulnerability

assessment to build climate change adaption, 기후변화 취약성 평가 지원 도구 시스템)을 이용하여 정량적인 취약성 평가를 실시하였다 (KACCC, 2018).

3. 결과 및 고찰

3.1 상수도시설 기후변화 취약성 평가

기후요소별로 상수도에 미치는 부정적 영향이 매우 크다(7점), 크다(6점), 약간크다(5점), 보통(4점), 약간작다(3점), 작다(2점), 매우작다(1점)로 구분해서 제주특별자치도 상수도부 직원 21명을 대상으로 기후변화요소별 상대적 중요성을 평가하였다. 응답자 전원이 가뭄을 기후변화요소 중에서 제주특별자치도 상수도에 가장 부정적인 요소로 선정하였는데 이는 2013년과 2017년에 가뭄으로 인해 하절기에 제한급수가 발생한 영향 때문인 것으로 평가된다. 응답점수를 평균한 결과는 가뭄(6.67), 폭염(5.67), 호우(4.19), 한파(3.90), 대설(3.19), 해수면상승(3.19), 강풍(2.43) 순으로 조사되어 가뭄, 폭염, 호우가 제주특별자치도 상수도시설에 보통(4.0) 이상의 부정적인 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

Table 2는 2018년 4월 기준으로 VESTAP을 이용하여 제주특별자치도 43개 읍면동을 대상으로 실시한 생활용수

pp. 479-485
pp. 487-497
pp. 499-505
pp. 507-515
pp. 517-526
pp. 527-533
pp. 535-550
pp. 551-557
pp. 559-572
pp. 573-581

Table 2. Vulnerability assessment of water supply on short term drought

No.	District		Vulnerability	Climate exposure	Sensitivity	Adaptive capacity
1	Jeju	Hankyung	0.26	0.24	0.09	0.07
2	Jeju	Ildo2	0.26	0.23	0.05	0.02
3	Jeju	Ido1	0.25	0.24	0.01	0
4	Jeju	Samdo2	0.24	0.23	0.02	0.01
5	Jeju	Youngdam2	0.24	0.23	0.03	0.02
6	Jeju	Ido2	0.24	0.20	0.08	0.04
7	Jeju	Gujwa	0.23	0.20	0.19	0.16
8	Seogwipo	Jungang	0.23	0.23	0	0
9	Seogwipo	Chungi	0.23	0.22	0.01	0
10	Jeju	Dodoo	0.22	0.22	0	0
11	Jeju	Hanrym	0.22	0.19	0.17	0.14
12	Jeju	Kunip	0.21	0.21	0.03	0.03
13	Jeju	Yeodo	0.21	0.20	0.04	0.03
14	Jeju	Gooja	0.20	0.19	0.01	0
15	Jeju	Whabuk	0.20	0.17	0.06	0.03
16	Jeju	Youngdam1	0.20	0.19	0.01	0
17	Seogwipo	Sungsan	0.20	0.13	0.24	0.17
18	Seogwipo	Jungbang	0.20	0.20	0	0
19	Seogwipo	Hyodon	0.20	0.19	0.03	0.02
20	Jeju	Woodo	0.19	0.19	0.01	0.01
21	Jeju	Samdo1	0.19	0.18	0.02	0.01
22	Jeju	Ildo1	0.19	0.19	0	0
23	Seogwipo	Songsan	0.18	0.19	0.02	0.03
24	Jeju	Yeon	0.17	0.15	0.07	0.05
25	Jeju	Iho	0.17	0.18	0.01	0.02
26	Jeju	Chochun	0.17	0.14	0.16	0.13
27	Jeju	Aewol	0.15	0.10	0.25	0.20
28	Seogwipo	Anduck	0.15	0.10	0.19	0.14
29	Seogwipo	Pyosun	0.15	0.10	0.21	0.16
30	Seogwipo	Namwon	0.12	0.07	0.25	0.20
31	Seogwipo	Yeorae	0.11	0.09	0.07	0.05
32	Jeju	Bongkae	0.10	0.09	0.04	0.03
33	Jeju	Samyang	0.09	0.17	0.04	0.12
34	Seogwipo	Donghong	0.09	0.06	0.06	0.03
35	Seogwipo	Daejung	0.08	0.15	0.21	0.28
36	Seogwipo	Dearyun	0.07	0.06	0.07	0.06
37	Jeju	Ora	0.06	0.07	0.04	0.05
38	Seogwipo	Seohyung	0.04	0.04	0.02	0.02
39	Seogwipo	Joogmoon	0.03	0.02	0.08	0.07
40	Jeju	Nohyeong	0	0.07	0.09	0.24
41	Jeju	Ara	0	0	0.07	0.08
42	Seogwipo	Daechu	0	0.05	0.05	0.22
43	Seogwipo	Youngchun	0	0.04	0.06	0.10



가뭄에 대한 취약성 평가 결과이다. 취약성 평가는 식 1에 표기된 바와 같이 기후노출도, 민감도, 적응능력을 고려하여 실시하는데 기후노출도는 표준강수지수와 증발산수요가뭄지수로 계산되며, 민감도는 생활용수 사용량, 적응능력은 GRDP(gross regional domestic product), 상수원 최대 저수량, 상수도 보급률, 비상용수 보유량 지표로 평가되며, 각 요소에 대한 가중치 α, β, γ 값은 각각 0.25, 0.25, 0.5로 설정되었다 (KACCC, 2018).

Table 2에서는 과거 가뭄으로 인한 제한급수가 발생한 지역을 취약성이 낮은 지역으로 평가하는 오류가 다수 발생되고 있다. 상수도는 관망으로 연결되는 특성상 VESTAP에서 행정구역별로 분석한 단기가뭄에 의한 생활용수 취약성 평가가 실제와는 다를 수 있다. VESTAP 평가자료중 적응능력 부분의 상수원 저수량, 비상급수 보유량의 내용이 반드시 해당 행정동 지역에만 국한된다고 평가하기가 어렵기 때문이다. 특정 지역에 상수원 저수지가 있다고 하더라도 해당 지역에서만 전량 활용할 수 있는 것이 아니라 정수장에서 정수를 한 후 다양한 급수지역으로 공급하고 있으므로 특정 지역에 상수원이 있다고 해서 그 지역의 기후변화 적응대책 수준이 높다고 평가하기는 어렵다. 제주특별자치도의 경우에는 VESTAP에서 상수원 최대 저수량 지표보다는 가뭄에 상대적으로 적응력이 높은 지하수 취수 정도를 지표로 반영하는 것이 바람직할 것으로 판단되며, 상수도 보급률은 전지역이 100% 이므로 지표로서의 의미는 없으며 비상급수 보유량은 지표로서의 의미가 있을 것으로 판단된다.

3.2 가뭄 적응대책

가뭄과 관련한 지속가능성이 높은 기후변화 적응 정책은 수요관리 정책이 우선이며, 수요관리 정책으로 대응이 미흡한 부분에 대해서는 공급역량을 강화하는 정책을 추진하는 것이 바람직하다. 물 공급 능력 강화를 위해서는 우선 누수 저감, 취수 능력 강화, 용수공급 체계 전환, 비상 연계관로 구축 등을 고려할 수 있다. 제주특별자치도에서도 공급량 증가를 위해서는 신규 지하수공의 개발 등은 최대한 지양하고 기존 수도시설의 미비점을 개선하는 방안, 즉 누수량 저감(유수율 향상), 지표수 취수 능력 증대 사업 등의 도입이 필요하다. 특히, 제주특별자치도는 2016년 기준 유수율이 45.7%로 전국 최저수준(MOE, 2018b)이므로 가뭄 대비 가장 파급효과

가 크고 우선적으로 추진해야 할 적응정책은 유수율 향상 사업이다.

한편, 수요관리와 공급능력 향상을 위한 급수체계 강화는 각각 2017년 12월 수립된 제주특별자치도 물수요 관리종합대책(JSSGP, 2017b)과 2018년 2월 수립된 제주특별자치도 수도정비기본계획(JSSGP, 2018a)에 세부 사항 및 연차별 추진계획이 포함되어 있으므로, 본 연구에서는 지표수 취수능력 증대 부분을 중심으로 적응대책을 검토하였다.

Table 1에서 심층지하수를 상수원으로 하는 광역상수도 9개 정수장(No. 8-16)은 시설가동 후에 가뭄으로 인한 취수량 저감 사례는 발생되지 않았으며, 가뭄으로 인한 지하수 수위 저하로 상수원 취수 수위가 영향을 받을 우려가 있을 경우에는 제주특별자치도의 조례에 의한 단계별 조치를 통해 제도적으로 관리하고 있다 (JSSGP, 2018c). 따라서 광역상수도 9개 정수장의 경우에는 일반적인 가뭄 발생시에도 상대적으로 안정적인 취수가 가능할 것으로 판단된다.

그러나, 용천수 또는 지표수를 취수하는 7개 정수장 (Table 1에서 No. 1-7)의 경우는 가뭄발생시 직접적으로 일정부분 취수량 감소가 확인되었다. 가뭄의 발생으로 크게 예상되는 문제점은 저수지 저수량 감소(어승생 저수지), 용천수 및 하천수량 감소, 지표수 수질 저하 등인데 가장 큰 문제점은 수량부족에 기인한 제한급수의 발생이다.

제주특별자치도에서 대규모 가뭄으로 인한 제한급수가 다수 발생하였는데 특히, 1964년 가을 가뭄, 1971년 여름, 가을 가뭄, 1975년 여름 가뭄이 심하였고, 1975년 7월 29일에는 물부족으로 인해 주민 50여명이 제주시에 집단 항의하기도 하였다. 이후 1982년 초여름에는 60년 만의 대가뭄이 발생하였고, 1988년 가을에도 3개월 가뭄 등이 발생하였다. 가뭄으로 인한 급수난은 용천수에 주로 의존하던 당시 상수도 시스템의 근본적인 취약성이라고 할 수 있다. 당시에 운영된 정수장은 Table 1에서 No. 1-7 정수장으로 모두 용천수, 하천수, 저수지수를 취수원으로 하여 무강우 기간이 길어질수록 취수량이 일정부분 감소하고 이는 직접적으로 수돗물 공급량의 감소로 이어졌기 때문이다 (JSSGP and JRI, 2012).

이러한 제주특별자치도 수돗물 공급체계의 취약성 개선을 위하여 심층지하수를 상수원으로 하는 광역상수도 건설사업이 추진되어, 1단계 사업으로 1996년까지 총 시설용량 135,000 m³/d의 정수장 5개소를 준공하고,

pp. 479-485

pp. 487-497

pp. 499-505

pp. 507-515

pp. 517-526

pp. 527-533

pp. 535-550

pp. 551-557

pp. 559-572

pp. 573-581

2008년에 총 시설용량 88,000 m³/d의 정수장 4개소를 준공하였다. 이를 통해 용천수 또는 하천수를 취수하는 No. 1-6 정수장에서 가뭄으로 취수량이 부족할 경우 심층 지하수를 취수하는 No. 8-16 정수장에서 생산량 증량을 통해 송배수 관로가 상호연계된 No. 1-6 정수장의 공급지역에 송배수함으로써 2008년 이후 15개 정수장 공급지역에서는 제한급수가 발생하지 않고 있다.

그러나, ES 정수장의 상수원인 어승생 저수지는 독립 상수원이며 다른 정수장의 송배수 관로와 연계율이 2.2%로 매우 낮아 어승생 정수장 공급구역의 경우 가뭄에 매우 취약한 구조를 갖고 있다. 실제 제주특별자치도 상수도 보급률이 100%가 달성된 2008년 이후에는 2013년, 2017년 여름에 각각 18일과 35일간 ES 정수장 공급계통에서 제한급수 사례가 발생하여 가뭄에 여전히 취약한 실정이다 (Jemin Ilbo, 2018; JSSGP, 2018a).

Fig. 2는 WS 정수장의 상수원인 외도천의 취수량과 심층지하수를 취수하는 인근 EW 정수장으로부터의 수수량을 표시하고 있다. 용천수 및 하천수를 취수하는 외도(YD) 취수장의 취수량은 가뭄으로 인해 2016년 일평균 약 10,000 m³/d에서 2017년 말에는 약 2,500 m³/d까지 급감하였는데 WS 정수장에서 제한급수가 발생하지 않은 이유는 외도천의 취수량이 감소한 부분만큼을 송수관로가 연계되어 있고 가뭄에 상대적으로 영향이 적은 심층지하수를 취수하는 EW 정수장에서 취수량을 증량하여 WS 정수장 공급계통으로 공급하였기 때문이다 (JSSGP, 2018b).

강정천을 상수원으로 하는 KJ 정수장에서도 가뭄으로 취수량 부족시 심층지하수를 취수하는 인근의 광역상수도 정수장인 HS 정수장에서 증량 생산하여 상호

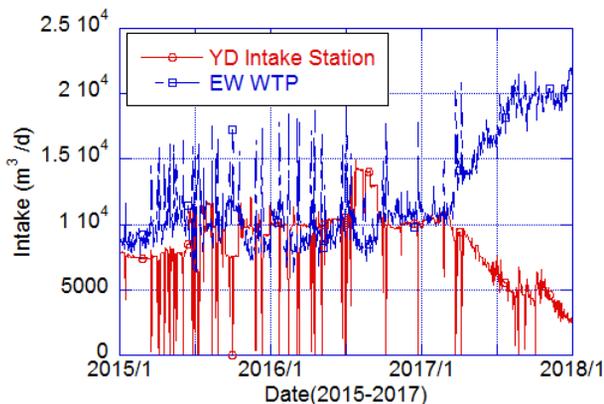


Fig. 2. Intake quantity of YD intake station and water supply from EW WTP.

연계된 송배수 관로를 이용하여 KJ 정수장 급수지역에 공급하고 있다. 강정천과 외도천의 취수보 만수위는 각각 2.6 m, 약 1.0 m 정도인데 취수보를 증고할 경우 일정 부분 저류용량의 증대를 기대할 수 있다. 취수보 증고를 통해 하천수의 취수량을 늘리면 심층 지하수를 상수원으로 하는 광역상수도의 취수량 감소를 유도할 수 있고, 이는 결국 지하수자원의 보존으로 이어질 수 있다. 취수보 증고를 위해서는 용천수의 용출량, 강우시 우수 유입량, 하천 유지용수량, 주변지역 침수 가능성, 하천의 홍수 배제기능, 하천 구조물의 누수 여부 등에 대한 충분한 검토를 통해 취수보의 적정 증고 높이를 산출하고 취수보 증고로 야기될 수 있는 부정적인 영향도 최소화하여야 한다.

한편, 제주특별자치도에서는 1인당 1일 물사용량 (lpcd) 자체를 줄이는 노력이 필요하다. 2007~2016년까지 lpcd 변동현황을 분석한 결과는 Fig. 3에 나타내었다. 전국 연평균은 매년 0.48% 증가하는데 비해서 제주특별자치도는 1.86% 증가하는 것으로 조사되었다. 2010년 이후 인구 및 관광객의 증가 추세를 고려하더라도 lpcd의 증가율이 너무 높은 수준으로 평가된다. 2016년 기준 lpcd는 전국평균이 287인데 비해 제주특별자치도는 305로서 전국평균 대비 6.3% 높은 수준이다 (MOE, 2018b). 높은 상수도 사용량은 하수도 배출량 증가, 하천 및 지하수위 저하, 가뭄 대응력 약화 등 다양한 문제를 야기할 수 있다.

Lpcd를 줄이기 위해서는 절수기기의 확대설치, 관련 법제도의 정비, 물절약 홍보 등이 필요하다. 제주특별자치도에서 2018년 2월에 수립한 수도정비기본계획에서 lpcd는 2015년 290.0에서 2030년 354.2로 연 1.5% 수준으로 지속적으로 증가하는 것으로 설정하였는데 이를 현재

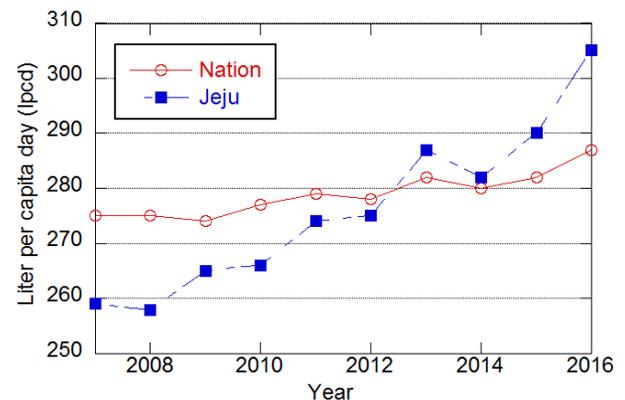


Fig. 3. Lpcd of national average and Jeju.



수준에서 관리하고 감소시키려는 적극적인 노력이 필요하다 (JSSGP, 2018a). 계획 인구 증가에 따른 전체적인 물 수요량의 증가는 일정부분 비례적이지만 lpcd가 지속적으로 증가한다는데 문제의 심각성이 있다.

3.3 폭염 적응대책

폭염이 상수도에 미칠 수 있는 영향으로는 용수 수요 증가, 지표수 수온 및 증발량 증가 등을 고려할 수 있다.

제주특별자치도의 취수원은 대부분 지하수 또는 용천수인 까담에 폭염에 의한 수온상승의 가능성은 상대적으로 작으나, 지표수의 경우에는 수온 상승에 직접적으로 영향을 받을 수 있는데 가장 대표적인 것인 조류(algae) 농도의 증가이다.

지표수가 취수원으로 사용되는 ES 정수장의 상수원인 어승생 저수지, WS 정수장의 상수원인 외도천 및 KJ 정수장의 상수원인 강정천은 수온상승에 따른 조류 개체수의 증가 및 이로 인한 색도(어승생 저수지) 및 이취미(외도 취수원) 발생 등이 관찰되고 있다.

어승생 제1저수지는 해발 596 m에 저수용량 106,000 m³의 규모로 1971년 준공 후 2018년 현재까지 약 47년간 사용 중으로 부영양화현상과 이로 인한 조류농도와 pH 및 색도의 증가 현상 등이 발생하고 있다. 2013년 3월에는 색도가 40도, pH가 9.46으로 관찰되었으며, 2015년 8월 1일 수심 4 m에서 채수한 시료에서는 Fig. 4에 표시된 바와 같이 조류 개체수가 13,877 cell/mL(남조류는 7,997 cell/mL), Chl-a 농도는 45.8 mg/m³으로 측정되었다. 남조류 개체수는 조류경보제의 관심 수준으로 발생하고 있으며 조류에 기인한 색도가 먹는물 수질 기준 이상으로 관측되고 있다. 이에 대한 적응대책으로 호소내 조류농도 저감을 위한 영양염류 농도관리, 수중 폭기장치 및 차광시설 설치, 호소 준설 등에 대한 검토와 발생된 색도를 저감하기 위한 고도정수처리 시설 등의 도입 검토가 필요하다 (Lee et al., 2016; Lee and Kim, 2017).

WS 정수장의 취수원인 외도천은 용천수 및 용천수에 기인한 하천수를 가동보로 저류한 후 집수매거를 이용하여 취수하는데 봄철에 조류에 기인한 이취미 문제가 주기적으로 발생하고 있다. 이에 대한 대응 방안으로 이취미 물질 처리를 위한 고도정수처리 공정의 도입이 필요하다. ES 및 KJ 정수장에 고도정수처리 공정을 도입하기 위해서는 수년간의 수질모니터링자료 분석, 최적

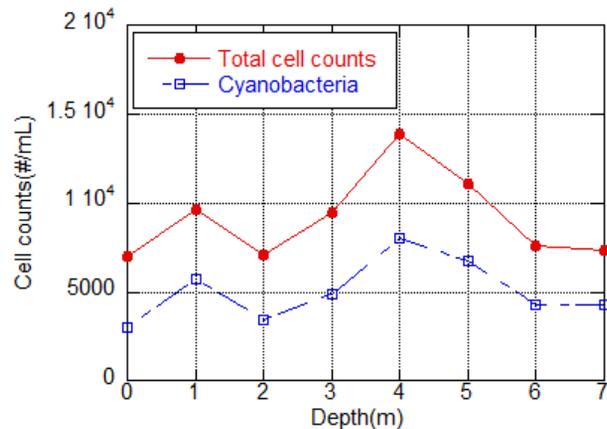


Fig. 4. Total algae and cyanobacteria counts at Eoseungsaeng 1st lake.

공정 선정을 위한 모형실험 실시, 공정도입을 위한 기본 및 실시설계, 시운전 등의 절차를 거치는 것이 바람직하다.

한편, 제주특별자치도는 지표수 상수원에서 조류, 이취미 물질 등의 다양한 오염물질이 존재함에도 불구하고 이에 대한 체계적인 수질검사가 미흡한 실정이다. 환경부에서는 법적인 먹는물 수질검사 항목외에 정수에 대한 먹는물 수질감시 항목을 시설용량 50,000 m³/d 이상의 정수장에 대해 2018년 기준 28항목 운영중에 있으며, 이 중 이취미 물질인 geosmin, 2-MIB에 대해서는 월 1회에서 주 3회의 빈도로 수질검사를 실시하도록 규정하고 있으나(MOE, 2018c), 제주특별자치도는 대규모 지표수 저류 시설이 부재한 까담에 정수장 시설용량이 7,500~35,000 m³/d으로 환경부의 감시항목 모니터링 대상에서 모두 제외되어 있어 이에 대한 개선이 필요하다.

또한, 환경부에서는 상수원의 분류(하천수, 호소수, 복류수, 강변여과수, 지하수 등)에 따라 상수원 수질검사 항목을 다르게 규정하고 있다. 환경부의 상수원관리 규칙에서는 하천수일 경우에는 매월 6항목이상, 매분기 25항목이상의 수질검사를 실시하도록 규정하고 있으나, 제주특별자치도는 일부 상수원을 지표수임에도 불구하고 지하수로 분류하여 상수원 수질검사를 부실하게 실시하고 있다. 강정천의 취수시설은 용천으로부터 약 150 m 하류의 하천에 설치되어 상수원을 하천수로 분류하여야 하나 지하수(용천수)로 분류하고 있으며, 외도천의 경우에도 가동보를 설치하고 하천수 및 유하 용천수를 집수매거의 형태로 취수하여 하천수의 특성을 갖고 있음에도 불구하고 지하수(용천수)로 상수원을 분류하여 반기 19개 항목에 대한 수질모니터링만 실시

pp. 479-485

pp. 487-497

pp. 499-505

pp. 507-515

pp. 517-526

pp. 527-533

pp. 535-550

pp. 551-557

pp. 559-572

pp. 573-581

하여 위해요소 관리에 취약하다 (JSSGP, 2018b; MOE, 2018c).

따라서 강정 및 외도 취수원에 대해서는 당초 지하수로 분류된 상수원을 하천수 및 복류수로 분류하고 하천수에 해당하는 수질검사 항목에 대한 모니터링을 강화하여야 할 것으로 판단된다. 또한, 용천수를 취수하는 OR, BD, DR, HR 정수장의 경우에도 강우시에는 원수의 탁도가 지표수의 영향을 받아 5 NTU를 상회하는 경우도 발생하므로 이에 대한 수질모니터링 강화도 요구된다.

제주특별자치도 상수도분야에서 폭염에 의해 발생하는 수온상승에 대비한 적응대책으로는 지표수 취수원 일 경우 시설용량이 50,000 m³/d 미만이라는 이유로 배제된 환경부의 먹는물 수질감시 항목중 최소 이취미 관련항목(geosmin, 2-MIB)에 대한 주기적인 모니터링과 어승생 저수지에 대한 조류 모니터링 강화가 필요하다. 또한 ES, WS 정수장에 대해서는 조류기인 색도, 이취미 농도 저감을 위한 고도정수처리공정 도입에 대한 타당성 검토가 필요하며, 기존에 일부 지하수(용천수)로 분류되었던 상수원을 하천수 또는 복류수로 재분류하고 지표수에 상응하는 수준으로 상수원수 수질검사를 강화하여야 한다.

3.4 호우 적응대책

호우가 발생할 경우 하천변에 위치한 수도시설은 하천 범람 등으로 침수가 발생할 수 있으며, 수질측면에서는 고탁수의 유입이 예상된다. 제주특별자치도에서는 2007년 9월 태풍 나리 발생시 집중호우로 강정 취수탑 상단에 다수의 부유물이 걸리기도 하였고, 어승생 제1저수지 도수로도 일부 유실되는 사고가 발생 하였다. 따라서, 하천변에 위치한 수도시설의 경우 집중호우에 대한 침수가능성 평가 및 시설 보완이 필요할 것으로 판단된다 (JSSGP and JRI, 2012).

Fig. 4는 2015년 1월 1일~2015년 6월 30일 동안의 외도 취수원 탁도와 취수량 및 EW 정수장으로 부터의 수수량 자료를 표시하고 있다. 외도 취수장에서 원수의 탁도가 경우에 따라 차이는 있지만 보통 2.0 NTU를 초과할 경우 취수를 중단하는 것으로 조사되었다. 6개월간 최대 원수 탁도는 9.3 NTU였으며, 총 25일 정도의 취수감량이 발생하였다. 외도 취수장의 취수량이 감소하는 만큼 지하수를 취수하여 정수처리 하는 EW 정수장으로부터의 수수량이 비례적으로 상승하는 것으로

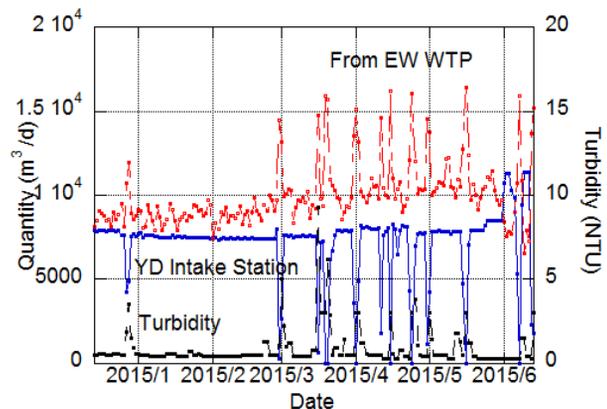


Fig. 5. Water quantity of YD intake station and EW WTP based on the raw water turbidity.

조사되었다. 이러한 경향은 Fig. 2에서도 관찰되었는데 외도 취수장에서는 가뭄으로 취수량이 부족할 경우나 원수의 탁도가 상승할 경우 모두 송배수 관로가 연계 운영가능한 EW 정수장으로부터 수수량을 증가시켜 대응하는 것으로 분석되었다.

제주특별자치도의 지속가능한 수자원 관리 차원에서 볼 때 상수도의 취수원으로는 지표수를 우선적으로 사용하고 지표수의 수량이 부족할 경우 지하수를 사용하는 것이 바람직하다. 그러나 외도 취수장의 경우 강우시 탁도가 대략 2.0 NTU 이상 상승할 경우 취수를 중단하고 인근 심층지하수의 취수량을 증가시키는 것으로 조사되었다. 외도천은 지표수 유출에만 의존하는 대부분의 육지부 하천과 달리 용천수와 지표수의 유출이 합쳐지는 경우로 집중호우기에도 원수의 탁도가 50 NTU를 초과하는 경우가 거의 없다. 2014년 1월 1일~2017년 12월 31일 동안의 외도 취수장의 원수 탁도는 최대 50.5 NTU, 최소 0.2 NTU, 평균 0.98 NTU로 조사되었다. 10 NTU 초과일수는 모두 21일로서 조사기간의 1.4%에 해당되었다. 원수 탁도 50 NTU 정도는 현재 WS 정수장에 설치하여 운영중인 급속여과기 시설로 충분히 처리가 가능한 수준이다.

원수의 탁도가 상승할 경우는 집중호우의 영향시기이며 이 시기는 풍수기이다. 따라서 심층지하수를 취수하는 EW 정수장으로부터의 수수량을 대폭 줄이고 하천수인 외도천의 취수량을 대폭 늘려서 정수처리 하는 것이 지속가능한 수자원의 이용 측면에서 바람직한 일이다. 외도 취수장의 탁도 상승은 집중호우시에 약 1~2일 정도 발생하므로 기 설치된 급속여과기로 정수처리하면 안정적으로 고품질의 수돗물을 생산 가능할 것으로 판단된다.



pp. 479-485
pp. 487-497
pp. 499-505
pp. 507-515
pp. 517-526
pp. 527-533
pp. 535-550
pp. 551-557
pp. 559-572
pp. 573-581

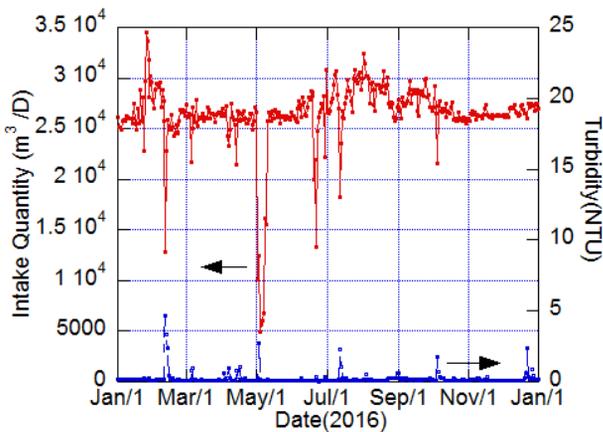


Fig. 6. Raw water turbidity and intake quantity at KJ WTP in 2016.

Fig. 6은 취수탑 상류 약 150 m 부근에서 용출후 유하한 하천수를 주요 상수원으로 하는 KJ 정수장의 2016년 일일 취수량 및 원수 탁도를 나타내고 있다. 집중호우에도 하천 유입수와 용천수가 혼합되어 원수의 최대 탁도는 10 NTU를 초과하는 경우가 거의 없으나 2016년 2월 12일 원수 탁도가 4.7 NTU일 경우 KJ 정수장에서는 일정시간 취수펌프 가동을 중단하여 2016년 일평균 정수생산량(26,460 m³/d)의 48.5% 정도만 생산하였고, 2016년 5월 4일은 전일 탁도가 2.76 NTU였으나, 정수생산량은 4,902 m³/d로서 2016년 일평균 정수생산량의 18.5% 수준이었다 (JSSGP, 2018b). 원수 탁도 상승에 기인한 취수 중단으로 인해 발생하는 부족한 송수량은 심층지하수를 취수하는 인근 광역상수도 HS 정수장의 생산량 증량 등을 통해 대응하고 있으며 이는 결국 지하수위의 저하를 유발하고 있다.

강정천은 비강우시 원수탁도가 대부분 0.2 NTU 내외의 양호한 수질을 나타내는 전형적인 용천수의 수질 특성을 갖고 있으나 집중호우시에는 강우 유출수 유입으로 인해 일시적으로 탁도가 상승하는 하천수의 수질 특성을 갖고 있으며, 이러한 원수 특성을 고려하여 KJ 정수장의 정수처리 공정은 취수-약품응집-침전-급속여과-염소(차아염소산칼슘)소독-송배수의 체계를 갖는 급속여과시스템의 수처리공정으로 구성되어 시설면에서는 충분한 적응능력을 갖추고 있다.

강수량의 부족, 지하수 함양량의 부족 등으로 외도천, 강정천의 유량 감소에 기인한 취수량 감소는 기후변화에 기인하는 외부적 요인에 의한 현상으로 볼 수도 있으나 외도천, 강정천 원수의 탁도가 정수장에서 충분히

처리 가능함에도 불구하고 원수 탁도가 약 2.0 NTU를 초과할 경우 취수를 감량하거나 중단하는 것은 조속히 개선하여야 할 것으로 판단된다.

제주특별자치도 기후변화 예측의 주요 특징은 강수량과 호우일수의 대폭 증가이다. 이는 지표수 또는 용천수의 탁도 증가 가능성이 상승함을 의미한다. 따라서 호우대비 적응대책으로 집중호우시에도 안정적으로 지표수를 취수해서 고품질의 수돗물을 생산할 수 있도록 정수장 근무자의 운영관리 능력 향상 및 시설개선이 필요하다.

4. 결 론

국가기후변화적응센터에서 제시하는 폭염, 한파, 호우, 대설, 강풍의 5대 기후영향요소와 가뭄, 해수면 상승 등의 기후변화에 대한 제주특별자치도 상수도시설의 취약성을 평가하고 적응대책을 검토하였다. 심층지하수를 취수하는 9개 정수장은 상대적으로 기후변화의 취약성이 낮았으나, 지표수 및 용천수를 취수하는 WS 등 7개 정수장의 경우에는 기후변화에 취약하였으며, 주요 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 제주특별자치도 상수도분야 공무원을 대상으로 실시한 인식도 조사결과 상수도분야에 미치는 부정적 영향이 큰 기후영향요소는 가뭄, 폭염, 호우 순으로 분석되었다.
- 2) 가뭄에 대한 가장 중요한 적응대책은 누수율 저감이다. 지표수 및 용천수를 취수하는 7개 정수장은 가뭄에 대비한 취수능력 증대가 필요하며, 특히 하천수를 취수하는 KJ, WS 정수장의 취수원에서는 기존 취수보 증고를 통한 취수능력 향상에 대한 검토가 필요한 것으로 분석되었다.
- 3) 폭염은 수온상승을 유발하여 지표수 취수원인 어승생 저수지, 강정천, 외도천에 조류농도 및 조류에 기인한 색도와 이취미 물질의 농도 증가를 유발하는 것으로 분석되었다. 이에 대한 적응대책으로는 조류, 이취미 물질 등에 대한 수질모니터링을 강화하고 색도 및 이취미 물질 농도 저감을 위한 고도정수처리공정 도입에 대한 검토가 필요하다.
- 4) 호우는 지표수 상수원의 탁도 상승을 유발한다. 지표수 및 용천수를 취수하는 WS 정수장 등 7개소는 집중호우시에도 정수장 유입 최대 탁도가 대부분 50 NTU 이하로 정수장에서 충분히 정수처리가 가능함에도 불

구하고 일부 정수장에서는 원수 탁도가 약 2 NTU를 초과할 경우 취수를 중단하고 송수관 연계운영이 가능한 심층지하수를 상수원으로 하는 인근 정수장에서 증량 생산하는 것으로 조사되었다. 이는 주로 탁도 상승에 대한 운영관리자의 대응력 부족에 기인하는 것으로 판단되며 적응대책으로 정수장 근무자의 전문성 향상, 시설 개선 등이 조속히 마련되어야 한다.

사 사

이 논문은 2018년도 제주대학교 교원성과지원사업에 의하여 연구되었습니다.

References

- Jemin Ilbo, 2018.07.25.
- JSSGP (Jeju Special Self-Governing Province) (2017a). *2016 statistical year book*.
- JSSGP (2017b). *Report on integrated water demand management plan of Jeju Province*.
- JSSGP (2018a). *Report on water facility maintenance master plan of Jeju Province*.
- JSSGP (2018b). Internal data.
- JSSGP (2018c). www.jeju.go.kr. (July 20, 2018).
- JSSGP and JRI (Jeju Research Institute) (2012). *Jeju waterworks 50 year*.
- KACCC (Korea Adaptation Center for Climate Change) (2018). ccas.kei.re.kr. (July 2, 2018).
- KMA (Korea Meteorological Administration) (2013). *Detailed analysis report on climate change forecast of Jeju Province*.
- Lee, J. and Kim, J. (2017). Chromaticity removal by chlorine and ozone oxidation in water treatment, J. Korean Soc. Water Wastewater, 31(4) 273-279.
- 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.
- MOE (Ministry of environment) (2018a). *2017 white paper of environment*.
- MOE (Ministry of environment) (2018b). 2016 waterworks statistics.
- MOE (Ministry of environment) (2018c). www.me.go.kr. (August 14, 2018).
- Park, D., Park, B. and Jung, E. (2017). Guidelines for the VESTAP-based climate change vulnerability assessment, J. Clim. Change Res., 8(4) 339-346.
- USEPA (US Environmental Protection Agency) (2015). *Adaptation strategies guide for water utilities*.
- Yoo, G. (2009). Assessment of climate vulnerability and adaptation, Physics and high tech. 32-36.