



기후변화 적응대책 수립을 위한 한강수계 지역 기후변화 동향 및 서울시 상수도 분야 현황 연구

박은희* · 장도일** · 김세철***†

*서울특별시 서울물연구원, 미래전략연구센터, 전략연구과 주무관, **서울특별시 서울물연구원, 수질분석부, 신물질분석과 주무관,
***서울특별시 서울물연구원, 미래전략연구센터, 전략연구과 과장

Climate Change Trends in the Han River Area - A Seoul Water Supply System Study

Park, Eunhee*, Chang, Doil** and Kim, Sechul***†

*Assistant director Water Strategy Research Division, Seoul Water Institute, Seoul Metropolitan Government, Korea

**Assistant director Division of Emerging contaminants, Bureau of Water Quality, Seoul Water Institute, Seoul Metropolitan Government, Korea

***Director Water Strategy Research Division, Seoul Water Institute, Seoul Metropolitan Government, Korea

ABSTRACT

The increase in CO₂ emissions from industrialization has led to global warming, which has increased the scale and frequency of extreme weather events, including heavy rains, floods, typhoons, and heat waves. Seoul is experiencing extreme climatic conditions such as global warming, drought due to rapid urbanization, and heavy rainfall. These changes point to anomalies in the water circulation system. Therefore, it is important to identify the degree of climate change and to identify vulnerabilities of Seoul's water supply system to maintain a stable supply.

In this study, we select the major influencing factors and analyze the climate change trends in the Seoul and Han River areas to establish fundamental plans for climate adaptation by Seoul Waterworks Division.

We referred to climate impact factors suggested by the Korea Institute for Environmental Policy and Evaluation (KEI) to select climate impact factors for analysis. In addition, Bigkinds, a website for searching media press releases, was used to sort news related to climate, Seoul, and waterworks from 1999 to 2018.

Based on these chosen climate impact factors, climate change trends in the Seoul and Han River areas were investigated using data from the Korea Meteorological Administration (KMA). To quantify the possibility of extreme climates events over the next 20 years (2021-2040), we assigned the "Extreme Climatic Indices" suggested by the KMA to an "Extreme Climate Indices Standardization Formula" provided by KEI.

In this regard, climate impact factors related to waterworks in Seoul were derived from "drought, heat, heavy rain, and cold wave". The quantified extreme climatic indices standardization score of Seoul was calculated as 5.0 for drought, 4.2 for heat wave, 1.0 for rainfall, and 1.0 for cold wave.

As a result we figure out the urgent problem to adapt climate change: Securing quantity and quality of water resources, water treatment facility inspection, and protect water pipe from breaking during winter. This study provides two major recommendations: to assess the climate risk in waterworks; and to research systematic water demand management.

The specific climate adaptation action plan will be established in the future with reference to this study, climate impact factor score, and risk assessment.

Key words: Waterworks management, Extreme climate, Climate adaptation, Climate Impact Factor, Risk factor, Water demand management

† Corresponding author: sckim@seoul.go.kr ((03741) #716-10 Cheonhodaero, Gwangjin-gu, Seoul, +82-2-3146-1880)

Received June 20, 2019 / Revised August 5, 2019 / Accepted August 23, 2019

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

산업화로 인한 이산화탄소 발생량의 증가는 지구온난화를 가져왔고, 이로 인해 전 지구적으로 폭우, 홍수, 태풍, 열파를 포함한 극한기후 현상의 규모가 커지고 발생빈도도 증가하고 있다 (Cho et al., 2014).

서울시 역시 지구온난화, 급격한 도시화로 인해 가뭄, 강우 편중 등 극한기후 현상이 발생 빈도가 증가함에 따라 물 순환계의 이상 징후가 나타나고 있다 (Kim et al., 2008). 물 순환계의 이상 징후는 상수도 공급에 직·간접적인 영향을 미치므로, 상수도 분야의 기후변화 노출 수준을 파악하고 이에 따른 취약점을 파악하는 것이 중요하다.

기후변화가 상수도에 미치는 영향은 크게 시설물 용량 및 유지보수, 극한 기후로 인한 시설관리 근로자의 생산성 및 안전성, 안정적인 서비스 공급 세 가지로 구분해볼 수 있다 (Ministry of Environment, 2017). 또한 지역적 특성에 따라 기후변화 양상이 다르기 때문에 상수도 시설에 미치는 영향력 역시 지역마다 다를 것이다.

영국은 2008년에 기후변화법 (Climate Change Act 2008)을 발효함에 따라 사회기반서비스 및 인프라를 담당하는 조직에 기후 변화가 미치는 영향력을 분석하고 기후 변화에 적응하기 위한 계획을 세우도록 했다. 이에 2010년 12월에서 2011년 12월의 1년 동안 ‘에너지, 운송 및 수도 분야’의 100개 이상의 조직이 보고서를 제출한 바 있다 (Government of UK, 2019).

우리나라 역시 환경부에서 저탄소 녹색성장 기본법 및 동법 시행령에 따라 공공기관 기후변화 적응대책 수립을 권고하고 있다. 수립 대상 기관은 크게 공공기관 및 지방공기업으로 나누어지며, 분야는 생활과 밀접한 관련이 있는 전력, 자원, 교통, 환경, 상수도 등이 있다. 또한, 국가 및 지자체 단위로 기후변화 적응대책을 수립하고 있으나, 공공서비스 분야 중 상수도 분야에 특화된 기후변화 적응대책 수립 여부는 각

지자체별로 상이하다.

서울시의 경우 여름철 풍수해 종합대책, 겨울철 한파 종합대책 등 기후영향요소별 대책을 마련하고 있으나, 여러 가지 기후영향요소를 고려한 종합 적응대책 세부 계획을 수립한 바는 없다. 본 연구는 안정적인 상수도 서비스 제공을 위해 서울시 기후변화 동향을 파악하고 서울의 상수도가 당면한 과제를 파악해 이를 기반으로 향후 「공공기관 기후변화 적응대책」의 세부 계획 수립함에 목적을 두고 있다.

1.2 연구 방법 및 범위

본 연구의 방법과 범위는 ① 서울시 상수도 분야에 미치는 기후영향요소 조사 ② 기상청 국가기후데이터센터의 기후데이터 분석 ③ 서울시 상수도 분야의 기후변화 적응에 대한 시사점 도출로 구성되어 있다.

먼저 서울시 상수도분야에 미치는 기후영향요소로 ‘폭염, 한파, 호우, 가뭄’을 선택했다. 환경부에서는 ‘폭염, 한파, 호우, 대설, 강풍, 가뭄’에 대해 고려하도록 권고 (Ministry of Environment, 2017)하고 있지만 언론 매체 및 서울시 상수도 사업본부 간행물 등에서는 대설이나 강풍에 대한 사건 사고는 상대적으로 적어 배제하였다. 언론매체에 보도된 자료는 빅카인즈 (언론보도자료 검색용 웹사이트)에서 Table 2.의 조건으로 검색하였다. 검색된 보도 자료는 총 1151건이었고 ‘서울시, 기후변화, 상수도’와 무관한 내용이 포함되어 있어 보도 자료의 제목 위주로 검토하여 유의미한 기사를 선별하였다.

다음으로 주요 기후영향요소별 동향을 분석하기 위해 기상청 국가기후데이터센터의 지상관측자료를 활용했다. 조사 지점은 한강수계에 속하는 ‘서울 (108), 양평 (202), 춘천 (101), 충주 (127)’를 대상으로 했다. 기간은 1973년부터 2017년까지 45년 동안 강수량, 기온, 무강수지속일 등에 대해 조사했다. 기후영향요소 별 극한기후발생가능성을 예측하기 위해 공공기관 기후변화 적응대책 수립 지원 도구 (Ministry of Environment, 2017)의 극한기후지수의 값 표준화식 (equation

Table 1. Extreme Climate Indices in accordance with Climate Impact Factors

Climate Impact Factors	Climate Change Scenario	Forecast Period	Extreme Climate Indices
Drought	RCP 8.5	2021~2040	Maximum Length of Dry Spell
Heat Wave	RCP 8.5	2021~2040	Heat Wave Days
Heavy Rain	RCP 8.5	2021~2040	Heavy Rain Days
Cold Wave	RCP 8.5	2021~2040	Cold Wave Days

1)을 활용했다. 표준화를 위해 기후영향요소별로 활용한 극한기후지수는 Table 1과 같다. 극한기후지수는 기상청에서 발간한 각 시도별 신기후체제 대비 기후변화 전망보고서의 ‘RCP 8.5 기후요소 전망’을 참고했다 (Korea Meteorological Administration, 2017).

마지막으로 기후변화 적응을 위한 서울시 상수도분야의 시사점을 도출하기 위해 서울시 상수도사업본부 내부문서 및 간행물에서 다뤄진 사건·사고 내역을 정리하고, 각 기후영향요소별 상수도분야가 직면한 과제를 다루었다.

2. 서울시 기후영향요소 선별 및 기후변화 동향

2.1 기후영향요소 선별

본 연구에서는 환경부의 공공기관 적응대책 수립 지원을 위한 리스크 평가 가이드라인 (Ministry of Environment, 2017)을 참고하되, 보도자료 검색 및 상수도사업본부 내부 문서에서 가장 많이 다뤄진 ‘가뭄, 폭염, 한파, 호우’를 서울시 상수도분야와 관련 있는 기후영향요소로 선별하였다.

빅데이터에서 1999년 1월 1일부터 2018년 12월 18일까지 언론매체에 보도된 기사를 검색한 결과 총 1,151건이 검색되

었다 (Table 2). 이 중 서울시 기후변화와 상수도에 관한 기사는 206건으로 ‘가뭄 30건, 폭염 42건, 호우 9건, 한파 122건, 강풍 3건, 대설 0건’이었다 (Table 3).

폭염과 가뭄의 경우 녹조 발생, 녹조/조류 발생으로 인한 수돗물의 심미적 특성 변화 등에 관한 기사가, 한파의 경우 수도관 동파에 관한 내용이 많았는데, 서울시 상수도 서비스 (수질, 안정적인 공급 등) 측면에서 당면한 현안과 일치함을 알 수 있다.

2.2 서울시 및 한강수계의 기후변화 동향

2.2.1 가뭄

본 연구에서는 서울시 및 한강수계의 ‘강수량’과 ‘무강우 지속기간’을 가뭄에 대한 판단자료로 활용했다. 서울의 주요 수원은 팔당호이며 팔당호는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 북한강과 남한강이 합류하는 지점 이후에 있기 때문에 조사 지점을 서울, 양평, 춘천, 충주로 선택했다. 강수량과 무강우지속기간 모두 기상청 국가기후데이터센터의 지상기상관측자료를 활용했다. 2008년부터 2017년까지 서울, 양평, 춘천, 충주의 연도별 합계강수량을 비교해보면 대체적으로 비슷한 것을 확인할 수 있다. 가뭄이 심했던 2014년부터 2016년까

Table 2. Search conditions of press releases

Key words by Climate Impact Factor	Drought	Seoul “Drought” Water treatment plant /Seoul “Drought” Waterworks / Seoul “Drought” Tap water
	Heat wave	Seoul “Heat wave” Water treatment plant /Seoul “Heat wave” Waterworks / Seoul “Heat wave” Tap water
	Heavy Rain	Seoul “Heavy Rain” Water treatment plant /Seoul “Heavy Rain” Waterworks / Seoul “Heavy Rain” Tap water
	Cold wave	Seoul “Cold wave” Water treatment plant /Seoul “Cold wave” Waterworks / Seoul “Cold wave” Tap water
	Gale	Seoul “Gale” Water treatment plant /Seoul “Gale” Waterworks / Seoul “Gale” Tap water
	Heavy snow	Seoul “Heavy snow” Water treatment plant /Seoul “Heavy snow” Waterworks / Seoul “Heavy snow” Tap water
Target period	Jan 1, 1999 - Dec 18, 2018	
Search Method	Morphological analysis	
The Press	Kyung Hyang Newspaper, Kookmin Ilbo, Naeil Shinmun, Dong-A Ilbo, Culture Daily, Seoul Shinmun, World news, Chosun Ilbo, Jungang Ilbo, Hankyoreh, Hankook Ilbo, Maekyung Media, Money Today, Seoul Economy, Asia Economy, Aju Economy, Financial News, Korea Economy, Herald Economy	

Table 3. Number of press releases refer to Seoul waterworks and Climate Impact Factor (1999~2018)

	Drought	Heat wave	Heavy Rain	Cold wave	Gale	Heavy snow	Sum
Number of reports	30	42	9	122	3	0	206

지는 서울, 양평, 춘천, 충주의 연도별 강수량은 2008년부터 2017년까지 평균 합계강수량의 약 66%수준이었다 (Table 4; Fig. 2).

무강우지속일의 평균값 역시 서울 외 한강수계 지점에서 큰 차이가 없는 것으로 나타났다 (Table 5). 무강우지속일은 강수량이 0 mm인 날이 지속된 일수를 말하는데 2008년부터 2017년까지 서울, 양평, 춘천, 충주의 무강우일수 평균값은 4.5 ~ 5.7일이다. 특이한 점은 2014년부터 2016년까지 강수

량이 다른 해의 절반 수준이었음에도 불구하고 무강우지속일에는 큰 차이가 없다는 것이다. 즉 2014년부터 2016년까지의 가뭄은 무강우지속일이 장기간 지속되어서가 아닌 전체적인 강우강도가 낮아 가뭄이 발생했던 것으로 판단된다.

2.2.2 폭염

1973년부터 2018년까지 한강수계지역의 여름철 평균기온과 폭염일수를 조사했다. 서울의 경우 폭염 시 인구밀도가 높은 도심지역에서 수돗물 사용량이 증가할 수 있다. 춘천, 양



Fig. 1. Han River Area.

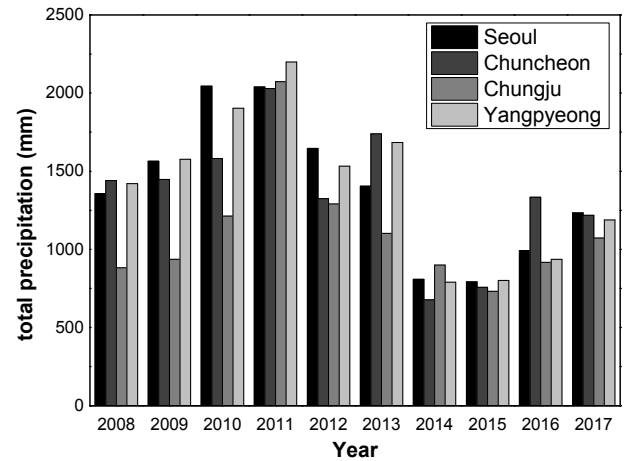


Fig. 2. Total annual precipitation of Seoul and Han River area (2008~2017).

Table 4. Total annual precipitation of Seoul and Han River area (2008-2017)

(Unit: mm)

Year \ Area	Seoul	Yangpyeong	Chuncheon	Chungju
2008	1356.3	1420.4	1439.4	882.5
2009	1564.0	1576.5	1446.9	936.8
2010	2043.5	1902.5	1581.4	1212.3
2011	2039.3	2198.5	2029.3	2073.3
2012	1646.3	1532.0	1324.3	1290.3
2013	1403.8	1683.1	1738.9	1102.6
2014	808.9	790.1	677.4	899.6
2015	792.1	801.5	757.8	731.8
2016	991.7	935.9	1333.8	917.1
2017	1233.2	1188.4	1217.2	1072.9
Average	1387.9	1402.9	1354.6	1111.9

Table 5. Maximum Length of Dry Spell of the Seoul and Han River area

(Unit: days)

Year \ Area	Seoul	Yangpyeong	Chuncheon	Chungju
2008	6.8	6.0	5.0	5.1
2009	5.8	4.8	4.0	4.3
2010	5.6	5.3	3.5	4.1
2011	6.4	6.5	4.7	5.5
2012	5.3	6.2	4.7	4.6
2013	5.3	6.0	4.0	4.8
2014	5.2	5.6	5.0	4.4
2015	5.5	5.6	4.4	4.2
2016	4.6	6.3	4.5	4.2
2017	5.6	4.4	4.7	4.4
Average	5.6	5.7	4.5	4.6

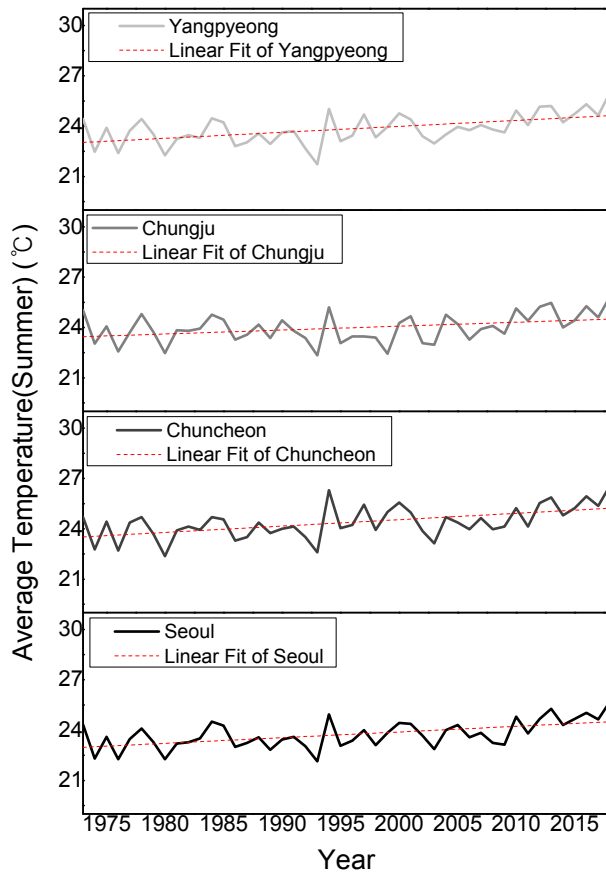


Fig. 3. Average summer temperature in Han River area (1973~2018).

평, 충주 지역에서 폭염이 발생할 경우 한강수계지역의 조류 발생 확률이 높아지게 된다.

한강수계지역의 폭염 동향을 조사하기 위해 국가기후데이터센터에서 제공하는 월별 평균기온, 폭염일수, 열대야일수를 활용했다. 여름철 평균기온을 계산하기 위해 각 연도의 월별 평균기온 중 우리나라 여름에 해당하는 6월부터 8월까지의 평균값을 계산했다 (Fig. 3). 폭염일수와 열대야일수는 각 연도의 폭염일수 합계로 나타냈다 (Fig. 4; Fig. 5).

관측기간이 짧아 결정계수 (R^2)가 크지 않지만 여름철 평균기온이 점점 올라가고 있고 (Fig. 3) 폭염일수는 일정한 패턴을 보이지 않고 증감하는 것을 알 수 있다 (Fig. 4). 특히 2018년은 서울, 춘천, 양평, 충주의 폭염일수가 각각 35일, 35일, 39일, 38일로 지난 46년 중 최댓값을 보였다 (Fig. 4). 열대야 일수는 인구가 많은 도심인 서울이 대체적으로 높은 값을 보였으며, 1990년대에 들어서 급격히 열대야 일수가 증가하는 것을 확인할 수 있었다 (Fig. 5).

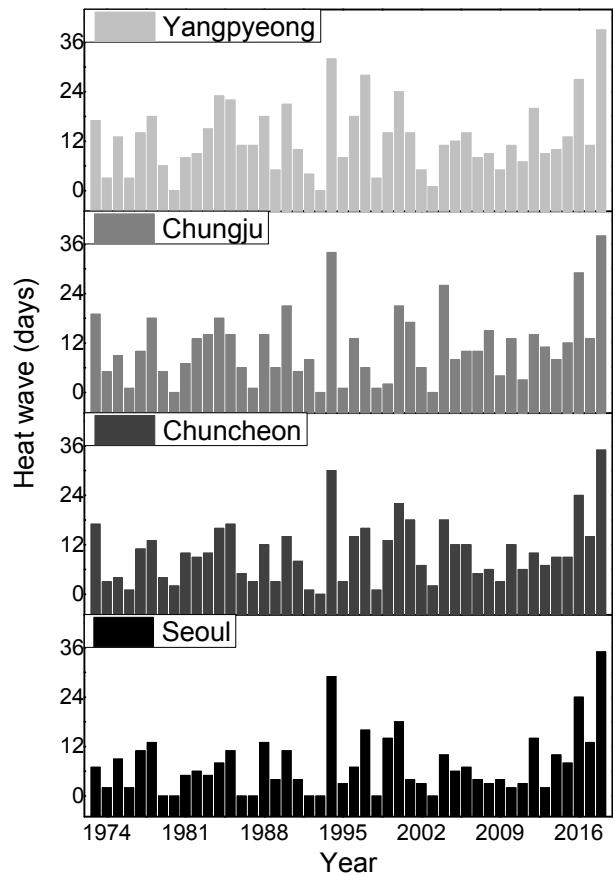


Fig. 4. Heat Wave days in Han River area (1973~2018).

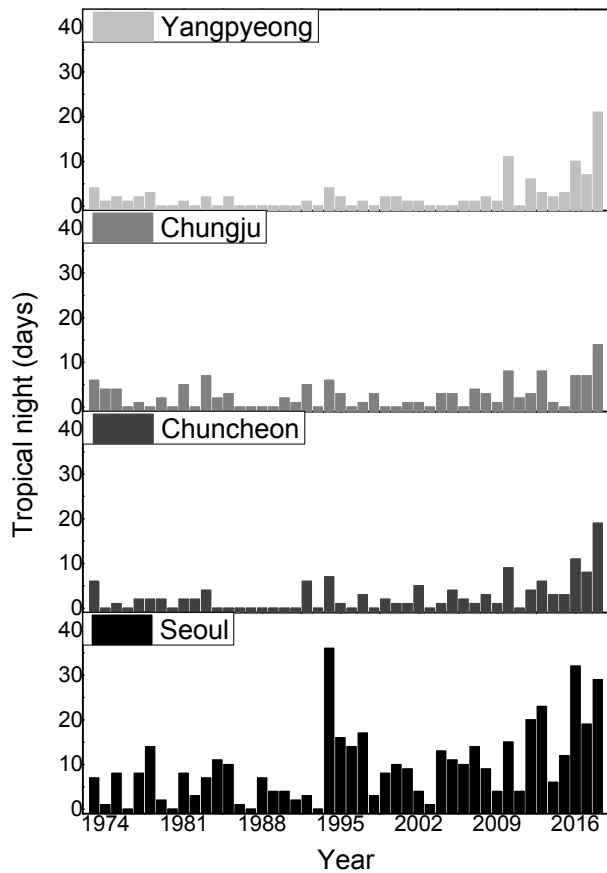


Fig. 5. Tropical night days in Han River area (1973~2018).

2.2.3 한파

한파에 대한 분석을 위해 서울의 겨울철 평균 기온, 한파주의보 및 경보 발령일수에 대해 조사했다. 여기서 겨울철은 해당 연도 12월부터 다음 연도 2월까지를 의미한다. 조사 지점으로 서울만 선택한 것은 한파가 영향을 미치는 상수도 서비스 분야는 계량기 동파이기 때문이다.

Fig. 6는 1973년부터 2017년까지 서울의 겨울철 평균 기온을 나타낸 것으로 점차 증가하고 있는 것을 확인할 수 있다. 1978년부터 1987년까지 10년간 평균기온은 -1.87°C 로 나타났다. 2008년부터 2017년까지 10년간 평균기온은 -0.98°C 로 30년의 기간 동안 평균기온이 약 0.9°C 상승했음을 알 수 있었다.

반면, 겨울철 평균기온의 상승과 무관하게 한파주의보 및 경보 발령일수는 2010년에 37일, 2011년에는 8일로 나타났다. 반면 겨울철 평균기온은 각각 -1.5°C , -2.3°C 로 근소한 차이를 보이며, 오히려 2011년의 겨울철 평균기온이 더 낮은

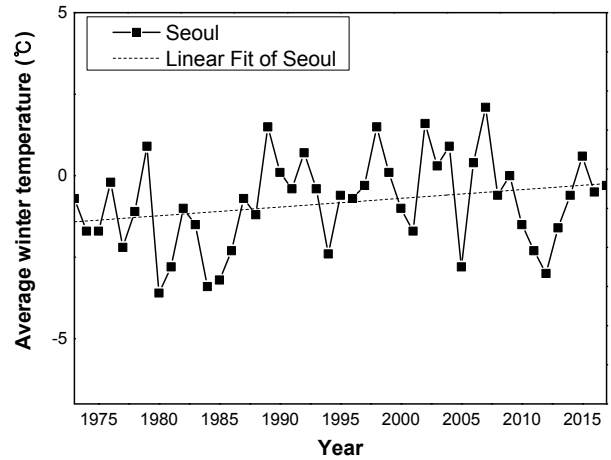


Fig. 6. Average winter temperature in Seoul.

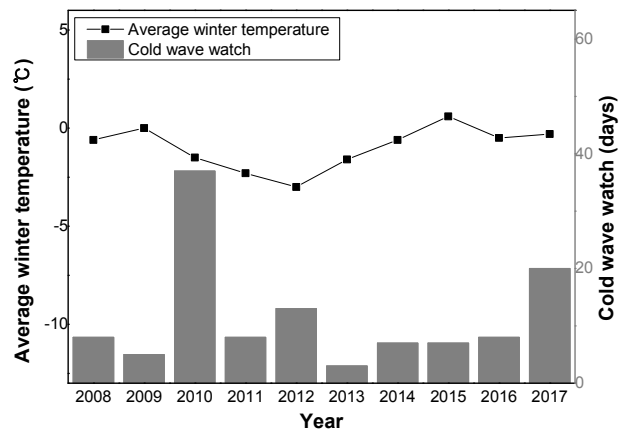


Fig. 7. Average winter temperature and Cold wave watch (2008~2017).

것을 확인할 수 있었다 (Fig. 7).

2.2.4 호우

우리나라의 전국 연간 강수량은 1307.7 mm이다. 계절별 강수량은 여름철이 723.2 mm로 연 강수량의 55%를 차지하고 있으며, 가을철이 259.7 mm (20%) 봄철이 236.6 mm (18%), 겨울철이 88.2 mm (7%)이다 (Han River Flood Control Office, 2018).

서울의 최근 6년간 (2012년~2017년) 월별 강수량 합계를 보면 7월에 가장 비가 많이 오고 초겨울부터 봄까지 (11월~3월) 비가 상대적으로 적게 오는 것을 알 수 있다 (Fig. 8).

단시간 동안 강우가 집중될 경우 정수장 등 수도물 공급 시설의 침수 피해가 발생할 수 있다. 총 강수량과 강우 강도

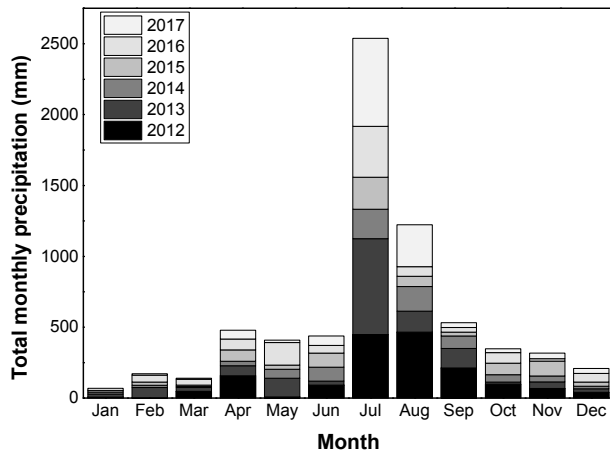


Fig. 8. Total monthly precipitation in Seoul (2012~2017).

를 확인하기 위해 1984년부터 2017년까지 서울의 일 최다강수량과 최다강수량이 있었던 날의 1시간 최다강수량을 확인했다 (Table 6). 34년 동안 일 최다강수량의 발생일은 대부분 여름철에 집중되어 있으며 강수량이 많았던 날에는 1시간 최다강수량도 높은 것을 확인할 수 있었다.

전국적으로 최근 30년간 여름철 집중호우 양상에 변화가 있었다. 1980년대 평균 여름철 강수량은 694.5 mm, 평균 여름철 강수일수는 36일이었던 반면 2011년은 1048.1 mm, 48일로 강수량과 강수일수가 증가한 것으로 나타났다 (Seo et al., 2011). 국가기후데이터센터 자료를 통해 서울 역시 여름철 강수량이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 1959년부터 1968년까지 여름철 평균 강수량은 276.6 mm인 반면 2009년부터 2018년까지 여름철 강수량은 850 mm로 강수량이 증가한 것으로 나타났다 (Korea Meteorological Administration, 2019).

3. 극한기후발생 가능성 정량화

3.1 극한기후발생 가능성 정량화 방법

한강 수계 지역 (서울, 양평, 춘천, 충주) 기후영향 요소의 발생 가능성을 정량적으로 나타내기 위해 환경부에서 제시하는 극한기후지수 표준화식을 사용했다. 표준화에 필요한 극한기후지수는 21세기 전반부 (2020년 ~ 2041년) 기후변화 시나리오 RCP 8.5에 따라 예측된 극한기후지수의 값 (최대무강우지속기간, 폭염일수, 호우일수, 한파일수)을 사용했다. 각 극한기후지수의 값으로부터 기후영향요소 (가뭄, 폭염, 호우, 한파)의 발생 가능성을 1점에서 5점 사이의 값으로 표준화했다 (equation 1; Ministry of Environment, 2017; Korea Meteorological Administration, 2017).

Table 6. Maximum daily precipitation in Seoul (1984~2017)

Year	Maximum daily precipitation (mm)	Month-day	Maximum hour precipitation (mm)
1984	268.2	09-01	59.5
1985	124.5	08-10	21.4
1986	147.8	07-24	45.1
1987	294.6	07-27	69.5
1988	101.6	07-09	24.3
1989	103.1	07-25	22.6
1990	247.5	09-11	43.6
1991	140.2	07-25	41.5
1992	153.3	08-27	40.5
1993	91.8	07-13	21
1994	79.4	10-12	15.2
1995	149.2	08-19	54
1996	168.6	07-26	37.1
1997	127.7	07-01	37.6
1998	332.8	08-08	61.2
1999	261.6	08-02	46
2000	122.9	08-25	28
2001	273.4	07-15	99.5
2002	178.0	08-07	60.5
2003	177.0	08-24	67
2004	108.5	07-16	27.5
2005	115.0	07-28	53.5
2006	241.0	07-16	45
2007	76.0	07-02	16.5
2008	127.5	07-24	43
2009	190.0	07-09	43.5
2010	259.5	09-21	75
2011	301.5	07-27	59
2012	137.0	08-21	35
2013	165.0	07-13	39.5
2014	59.5	07-25	34.5
2015	80.0	07-25	31
2016	108.5	07-01	31.5
2017	144.5	07-10	32

$$Y = 4 \times \frac{X - (\text{극한기후지수의 값 중 최솟값})}{(\text{극한기후지수의 값 중 최댓값}) - (\text{극한기후지수의 값 중 최솟값})} + 1 \quad (\text{Eq.1})$$

(X: 극한기후지수의 값, Y: 기후영향요소의 발생가능성)

3.2 한강수계 지역의 극한기후 발생 가능성

본 논문에서는 서울, 양평, 춘천, 충주지역의 극한기후 발생 가능성에 대해 조사했다. 서울의 주요 수원은 팔당호이다. 팔당호는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 북한강과 남한강이 합류하는 지점 이후에 있다. 따라서 양평, 춘천, 충주 지역의 극한기후지수를 표준화하여 수량, 수질에 주요한 영향을 미치는 가뭄, 폭염의 발생가능성을 평가하였다.

양평, 춘천, 충주의 경우 각 도시가 속한 ‘도’단위로 극한기후지수를 제시하고 있어, ‘경기도, 강원도, 충청북도’의 극한기후지수 값을 활용했다 (Korea Meteorological Administration, 2017). 기후영향 요소의 발생가능성 표준화 식에 따라 각 기후영향 요소의 발생가능성을 표준화한 결과는 Table 7과 같다.

표준화 점수를 보면 한강 수계지역 모두 가뭄의 발생 가능성이 가장 큰 것으로 나타났다. 가뭄 다음으로 높은 점수

를 받은 것은 서울과 경기도의 경우 폭염이고, 강원도와 충청북도는 한파였다. 서울과 경기도에서 폭염이 점수가 높은 것은 도시화 및 높은 인구밀도 때문인 것으로, 강원도와 충청북도는 지리적 특성 때문에 한파의 점수가 높은 것으로 추정된다.

기후영향요소 중 모든 지역에서 점수가 높은 가뭄은 상수원 수질 및 수량 확보와 밀접한 관련이 있다. 특히 서울시의 폭염은 물 사용량 증가와 밀접한 관계가 있어 상수도 수요-공급의 불균형을 초래할 수 있다. 한파는 상수도관 및 계량기 동파의 원인으로 상수도 공급과 요금 수납 등 경영 측면의 문제와 연결될 수 있다. 따라서 기후영향요소별 발생할 수 있는 문제점과 이에 대한 구체적인 대응 방법을 마련할 필요가 있다.

4. 서울시 상수도분야의 기후변화 적응에 대한 시사점

4.1 서울시 상수도 공급 현황

2016년 기준서울시 연간 상수도 총생산량은 1,162,268,000 m³/년, 급수인구수 (인근 지자체 포함)는 총 10,465,057명으

Table 7. Quantification score for possibility of extreme climate event in the Seoul and Han River area according to RCP 8.5

Area	Climate Impact Factor	Extreme Climate Indices	Days	Quantification (Score)
Seoul	Drought	Maximum Length of Dry Spell	26.1	5.0
	Heat Wave	Heat Wave Days	21.4	4.2
	Heavy Rain	Heavy Rain Days	2.1	1.0
	Cold Wave	Cold Wave Days	2.1	1.0
Gyeonggi-do	Drought	Maximum Length of Dry Spell	34.9	5.0
	Heat Wave	Heat Wave Days	15.7	2.6
	Heavy Rain	Heavy Rain Days	2.5	1.0
	Cold Wave	Cold Wave Days	14.4	2.5
Gangwon-do	Drought	Maximum Length of Dry Spell	33.0	5.0
	Heat Wave	Heat Wave Days	5.5	1.3
	Heavy Rain	Heavy Rain Days	3.1	1.0
	Cold Wave	Cold Wave Days	26.9	4.2
Chung-cheongbukdo	Drought	Maximum Length of Dry Spell	29.8	5.0
	Heat Wave	Heat Wave Days	11.0	2.3
	Heavy Rain	Heavy Rain Days	2.4	1.0
	Cold Wave	Cold Wave Days	12.5	2.5

로 1개 특별시 및 6개 광역시 중 생산량과 급수인구수가 가장 많다 (Fig. 9).

서울시에는 아리수 정수센터 (강북, 암사, 광암, 구의, 독도, 영등포)는 총 6 개소, 수도사업소는 총 8개소가 수돗물 공급을 위해 운영되고 있다. 정수센터에서는 표준처리시설에 고도정수처리시설을 추가로 설치·운영함으로써 표준처리시설로 제거하기 어려운 맛·냄새 물질 (2-MIB, 지오스민)을 제거하여 안전하고 건강한 수돗물을 공급하고 있으며 (The Office of Waterworks Seoul Metropolitan Government, 2018), 서울시 수돗물 중 가정용 급수량이 차지하는 비율은 약 65%로 조사되었다 (Water Resources Management Information System, 2016).

4.2 기후변화에 따른 상수도 주요 영향 분야 및 적응 대책 마련의 필요성

4.2.1 수량 확보 (관련 기후요소: 가뭄, 폭염)

우리나라의 경우 연중 강수량의 약 50%가 여름철에 집중되어 있어 안정적인 수돗물 공급을 위해서는 수량 확보가 중요하다.

수도권 지역의 중요한 상수원인 한강수계의 10년간 강수량은 모두 여름철에 강수량이 집중되어 있으며, 2014년부터 2016년까지 연간 강수량이 다른 해에 비해 낮아 가뭄이 지속된 것을 알 수 있다 (Fig. 10; Fig. 11).

강수량이 적고, 여름철 폭염이 더해질 경우 상수도 중 가정용 급수량이 약 65%인 서울시 (Water Resources Management Information System, 2016)는 물 수요가 급증하게 되어 심미적 특성이 확보된 상수도 공급에 어려움이 생길 수 있다. 실제로 2018년에는 폭염으로 인해 여름철 (6월~8월)

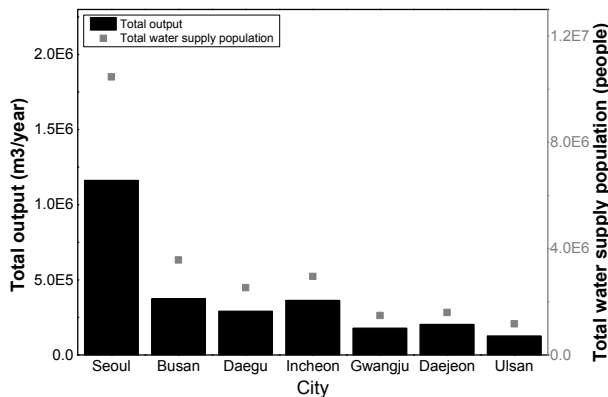


Fig. 9. Total output of tap water and water supply population in seven major cities in Korea (2016).

수돗물 공급량이 310,019,882 m³로 2017년 대비 약 6,600 m³ 증가한 것을 확인할 수 있었다. 각 연도별 서울시 인구수로 나누어 1인당 공급된 수돗물 양을 계산하면 2018년은 약 31.7 m³, 2017년은 약 30.8 m³로 1.1 m³정도 차이가 있다. 이는 폭염으로 인해 수돗물 수요량이 늘어나면서 수돗물 공급량이 함께 증가함에 따른 것으로 사료된다.

가뭄은 다른 기후영향요소와 달리 몇 년에 걸쳐 긴 시간동안 지속되는 특성을 보인다. 서울의 경우 2014년부터 2016년까지 총 강수량이 다른 해에 비해 적은 것을 확인할 수 있다 (Fig. 10). 특히 팔당호 수량은 전년도, 당해 연도 강수량과 연계하여 증감하기 때문에 가뭄 단계별 적응대책을 마련할 필요가 있다. 또한 폭염 시에도 양질의 수돗물을 공급할 수 있도록 서울시 내 구 단위 특성 (주거 형태, 공단 밀집 여부, 물 사용패턴 등)을 조사하고 서울시 내 정수장 및 배수지 연계를 통한 폭염 시 수돗물 부하량의 적정 배분, 인근 지자체 상수도과 급수관 연결 검토, 물 절약 활성화 정책 추진 등을 검토하는 것이 필요하다.

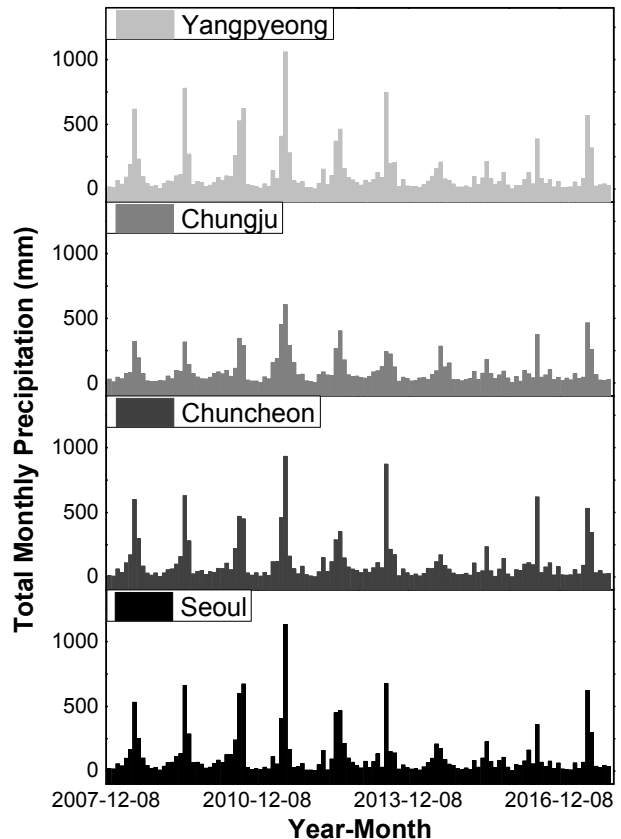


Fig. 10. Total monthly precipitation in the Seoul and Han River area (2008~2017).

4.2.2 수질 및 정수처리공정 (관련 기후요소: 가뭄, 폭염)

폭염, 가뭄은 상수원 조류 발생의 원인 중 하나이며, 조류 및 조류로 인해 발생하는 부산 물질은 수처리 장이나 수돗물의 심미적 특성 (맛·냄새)에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

최근 10년 (2008년 ~ 2017년) 중 2014, 2015, 2016년은 다른 해에 비해 기온이 높고 강수량이 적었다 (Fig. 11). 특히 2년 연속 가뭄이 지속되었던 2015년에는 취수원의 총 조류 세포수는 다른 해에 비해 전반적으로 높았고 (Fig. 12) 이에 따라 취수원의 맛·냄새 물질 농도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다 (Fig. 13)

현재 서울시 상수도사업본부의 모든 정수센터는 고도정수처리를 하고 있으므로 맛·냄새물질에 대한 대응이 가능한 상태이다. 그러나 갑작스러운 가뭄 또는 폭염이 발생할 경우, 고도정수처리용량에 부하가 걸려 심미적 특성을 확보한 수돗물 공급에 어려움이 있을 수 있다.

따라서 서울시 정수장 및 배수지 연계를 통한 폭염 시 수돗물 부하량의 적정 배분하고 과부하로 인한 고장 및 사고에 대응할 수 있는 시설 점검 대책을 마련해야 할 것이다.

4.2.3 계량기 동파 (관련 기후요소: 한파)

한파는 상수도 분야 중 계량기 동파와 직접적인 관련이 있다. 현재 서울시 상수도사업본부는 계량기 동파에 대비하기 위하여 일 최저기온을 기준으로 ‘관심, 주의, 경계, 심각’ 4단계로 나누어 인력 운영을 달리하고 있으며 세대별 맞춤형 보온조치를 시행하고 있다.

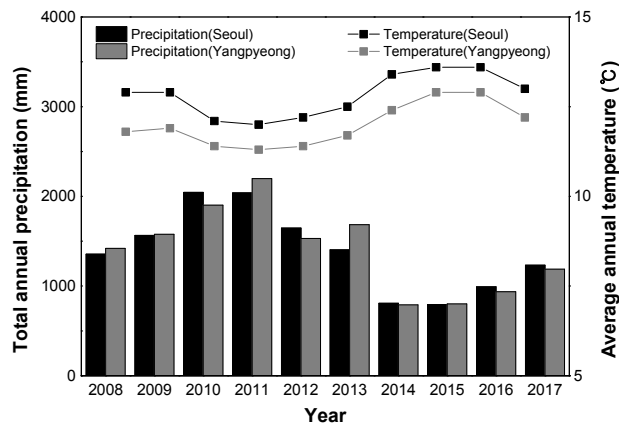


Fig. 11. Total annual precipitation and average temperature in Seoul and Yangpyeong (2008~2017).

Fig. 14은 2008년부터 2016년까지 계량기 동파건수와 한파주의보 및 경보일수를 나타낸 것이다 (The office of Waterworks Seoul Metropolitan Government, 2017; Korea Meteorological Administration, 2018). 한파주의보 및 경보 발령 일수가 많았던 2010년에는 계량기 동파 건수가 약 25,000건에 달하였으나 한파주의보 및 경보 발령일수가 감소하는 추세와 유사하게 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

특히 2015년부터 2017년까지 한파주의보 및 경보 발효 일수가 증가했음에도 불구하고 동파사고 건수는 점점 감소하는 것을 확인할 수 있다 (Fig. 14). 이는 건물 특성별로 유형을 나누어 보온조치를 실시하고 보온재 성능을 개선 등 ‘세대별

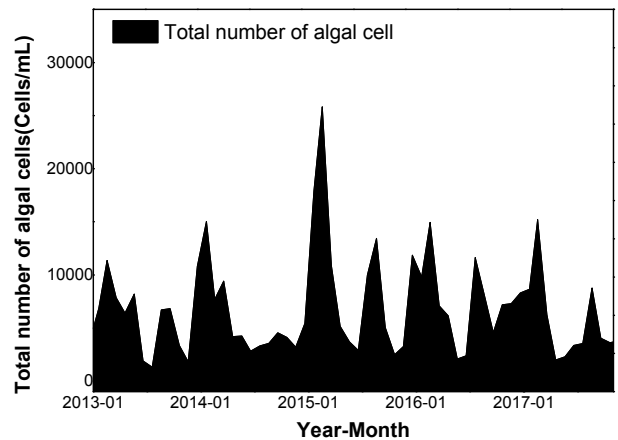


Fig. 12. Average total number of algal cells in Seoul water intake station (2013~2017).

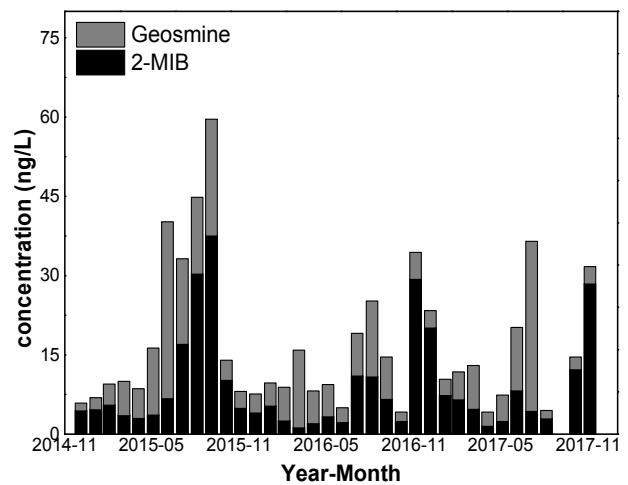


Fig. 13. Average monthly concentration of Geosmine and 2-MIB in Seoul water intake station (2015~2017).

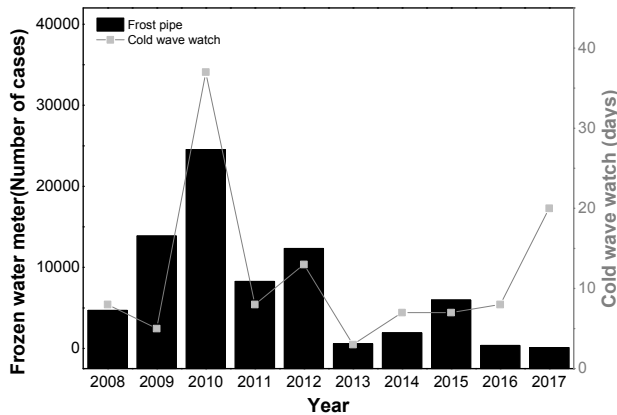


Fig. 14. Number of frozen water meter and Cold wave watch.

맞춤형 보온조치'를 취함에 따른 결과로 사료된다.

2.2.2절에서 살펴본 바와 같이 기후영향요소 중 한파는 1.0 점으로 다른 요소에 비해 발생 가능성이 적다. 그러나 동파 예방을 위한 꾸준한 조치가 필요하다. 한파는 수도계량기 및 배관 동파의 주요 원인이며, 수도계량기가 동파될 경우 정확한 수도요금을 부과할 수 없기 때문이다. 이는 상수도사업본부의 경영 측면의 문제가 될 수 있다.

서울시 상수도사업본부는 2000년대 중반까지 계량기를 보온재로 감싸서 보호하는 방법을 택했다. 그러나 북극진동으로 인해 한파경보 및 주의보 발령일수가 높았던 2010년에는 동파 건수가 약 2만5천건으로 2009년 대비 1만1천건 증가한 것을 확인할 수 있다 (Fig. 12). 계량기 1개당 금액을 2만원으로 가정하면, 2009년 대비 계량기 구매비용이 2억2천만원 더 소요된 것이다. 또한 계량기 교체를 위한 인건비, 수도사용량과 부과요금의 불일치, 시민 불편을 감안하면 피해액은 더 컸을 것으로 사료된다.

매년 '검침 및 계량기 교체'를 위해 투여되는 예산이 150억 이상 산정되어 있으며 동파 발생 시 계량기 교체 작업 등으로 인한 민원 증가, 한파 경보 및 주의보 발령일수가 불규칙하게 증감하는 것을 감안하여 '계량기 성능 향상, 보온덮개 성능 개선 및 보급, 동파주의 안내문자 발송' 등 꾸준한 동파 방지 대책을 세울 필요가 있다.

4.2.4 정수장 침수 (관련 기후요소: 호우)

2000년도 이전에 호우로 인해 서울시의 정수장 일부에 침수 사고가 발생한바 있다. 1984년, 1990년 홍수기간 중에 발생했는데, 특히 1990년 홍수는 주목할 만하다. 이 홍수로 인해 한강대교 수위는 11.27 m까지 올라갔고, 노량진정수장, 영

등포 정수장의 침수사고가 있었다. 이 사고로 인해 노량진 정수장 급수구역인 노량진 1·2동, 본동, 상도 1~4동, 흑석 1·2동, 대방, 신대방 1·2동, 여의도동, 신길 2·3·6동, 신림 4·8동 등 18개 동 10만 5천 가구와 영등포 정수장 급수구역인 은평구 18개동, 강서구 15개동, 마포구 2개동 등에서 22만 가구가 급수 중단되었다 (Jin et al., 2008)

한강수계의 호우 표준화 점수는 1점으로 타 기후영향 요소에 비해 영향력 낮고 서울의 정수장은 침수사고 이후 정수장 시설물을 보완한 바 있다. 그러나 단기간 동안에 강우가 집중될 경우 침수 피해가 발생할 수 있고, 여름철 평균 강수량과 강수일수가 점점 증가하고 있음을 고려하여 침수에 따른 시설물 안전관리 방안, 공사현장 등 근무직원의 안전을 위한 대책 마련이 필요할 것이다.

4.2.5 기후변화 적응대책 마련의 필요성

극한기후 현상은 예고 없이 발생한다. 따라서 갑작스러운 극한 기후 발생 시 시민의 생활 및 안전과 밀접한 관련이 있는 상수도 분야에서는 유연하게 대처할 수 있어야 한다.

서울시 상수도사업본부는 현재 「공공기관 기후변화 적응대책 수립」을 추진 중에 있다. 기후영향 요소 발생 가능성과 '공공기관의 기후변화 대응수준' 체크리스트를 응용해 서울시 상수도사업본부의 기후변화 대응 수준과 리스크를 파악하고 대응 방법을 제시할 예정이다.

이를 위해 본 연구에서는 「공공기관 기후변화 적응대책 수립」시 고려해야할 사항과 「기후변화 대응을 위한 물 수요관리 추진방향 전환」에 대하여 다음의 내용을 제안한다.

첫째, 서울시 상수도 분야에 적합한 리스크 평가 체크리스트를 개발해야한다. 환경부에서는 '전력, 환경, 유류·자원 관리 시설, 교통·도시기반시설, 용수공급시설' 등 각 분야에 적합한 체크리스트 기본 (안)과 기후영향 요소로 '폭염, 한파, 호우, 대설, 강풍, 가뭄'을 제시했다 (Ministry of Environment, 2017). 그러나 현실성 있는 리스크 평가를 위해서는 '내부 사례 분석, 타 지방자치단체 상수도 및 광역상수도 공급 기관 사례 조사, 전문가 의견 수렴' 등을 통해 서울시의 상수도 시설물 및 인력 특성을 고려해 체크리스트를 개발해야할 것이다.

둘째, 적극적인 물 수요관리를 추진할 필요가 있다. 앞서 살펴본 바와 같이 가정용 급수량의 비중이 높은 서울시에서는 가뭄 및 폭염 시 1인당 물 사용량이 증가할 것으로 예측된다. 따라서 기후변화에 따라 증감하는 물 수요를 체계적으로 관리할 필요가 있다. 현재 서울시 물 수요관리의 기본 방향

은 '최적유수율을 통한 물낭비 방지 및 물절감, 절수기 설치 확대 및 요금현실화를 통한 물절약, 물재이용을 통한 도시용수 증가 및 부족량 대응'으로 설정되어있다 (The Office of Waterworks Seoul Metropolitan Government, 2016). 이 중 유수율은 2018년 12월 기준 95.6%로 이미 세계적인 수준에 도달한 상태 이므로 유지 관리에 초점을 맞춰야 할 것이다. 따라서 공급자 위주의 물 수요관리를 '수요자 참여 물 수요관리'로 전환하기 위해 절수기기 보조금 지급제도, 요금 변동성 (여름철 탄력 요금제), 피크타임 관리 등의 제도적 방안 마련에 초점을 맞춰야 할 것이다. 마지막으로 여름철 폭염에 유연하게 대응할 수 있도록 정수센터를 증축하거나 급수망 연계를 검토해볼 수 있을 것이다.

셋째, 효과적인 「공공기관 기후변화 적응대책 수립」 및 「기후변화 대응을 위한 물 수요관리 추진방향 전환」을 위해 정책 시행 과정에서 그 효과를 주기적으로 확인하고, 시행 계획을 보완하는 것이 필요하다. 이는 정책의 효과가 시기와 상황에 따라 긍정적일 수도 부정적일 수도 있기 때문이다 (Lee, 2016). 즉 기후변화 예측의 불확실성, 환경변화 (생태계 변화, 인간 생활 패턴 변화 등)를 주기적으로 점검하고 이를 정책에 반영하려면 주기적으로 적응대책 및 수요관리 계획을 수정·보완하는 작업이 필요하다.

5. 결론

본 연구에서는 상수도 분야 기후변화 적응대책 수립의 기반을 마련하고자 ① 서울시 기후변화 동향 ② 극한기후 발생 가능성 정량화 ③ 서울시 상수도분야의 기후변화 적응에 대한 시사점을 제시하였다.

서울시 상수도 분야에 영향을 미치는 기후 요소는 가뭄, 한파, 호우, 폭염으로, 가뭄과 폭염은 물 수요 및 공급, 녹조 발생으로 인한 수돗물 심미적 특성과 관련 있다. 집중 호우 시에는 정수센터의 침수 등 발생 가능성에 대비하여 정수장 안전진단 용역 등에서 검토가 필요하다. 마지막으로 한파의 경우, 계량기 동파 방지를 위해 주기적인 점검과 보온재 교체 등이 필요할 것이다.

현재 서울시 상수도사업본부에서는 풍수해 대응, 재난 대응, 가뭄 대응 등을 위한 대책을 수립하고 있으나, 기후변화 취약시설을 선정하거나 기후변화 리스크를 평가한 바는 없다. 따라서 향후에는 본 내용을 바탕으로 기후변화 리스크를 평가하고 탄력적으로 적응하기 위한 세부시행계획으로 서울시내 정수장 및 배수지 연계를 통한 여름 부하량의 적정한 배분, 안정적 수질 및 급수량 확보를 위한 인근 지자체와 연계

급수망 구축 및 물 절약 활성화에 초점을 맞춘 물 수요관리 등이 필요할 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 서울특별시 서울물연구원의 “기후변화 적응을 위한 서울시 상수도 분야 현황 조사” 연구 결과물의 일부 내용을 바탕으로 재구성하여 작성되었음을 밝힙니다.

REFERENCES

- Cho. 2018. Study on the Total Number of Algal Cells in Seoul's Water Intake Point, Research Report, 2018-03-09.
- Government of United Kingdom. 2019. 2010 to 2015 government policy: climate change adaptation; [accessed 2019 May 1].
<https://www.gov.uk/government/publications/2010-to-2015-government-policy-climate-change-adaptation/2010-to-2015-government-policy-climate-change-adaptation#appendix-1-adaptation-reporting-power>
- Han River Flood Control Office. 2018. Characteristic of Korean Flood [accessed 2018 December 1].
<http://www.hrfco.go.kr/web/floodPage/floodClass.do>
- IC Jin, KH Kim, YS Park, JR You. 2008. One Hundred Year Report on Seoul Waterworks. The Office of Waterworks Seoul Metropolitan Government. Policy Report 2008-09-01.
- Jl Kim. 2018. Ten-Year Study on the Causes for the Presence of 2-MIB and Geosmin in the Han River for Ten Years, Research Report, 2018-12-26.
- KH Seo, JY Lee. 2011. The Monsoon Season White Paper. Korea Meteorological Administration. Policy Report 2011-06-22.
- Korea Meteorological Administration 2017. Climate Change Outlook Report in Preparation for the Paris Agreement (Chungcheongbuk-do). Policy Report 2017-12-08.
- Korea Meteorological Administration 2017. Climate Change Outlook Report in Preparation for the Paris Agreement (Gangwon-do). Policy Report 2017-12-08.
- Korea Meteorological Administration 2017. Climate Change Outlook Report in Preparation for the Paris Agreement (Gyeonggi-do). Policy Report 2017-12-08.
- Korea Meteorological Administration 2017. Climate Change

- Outlook Report in Preparation for the Paris Agreement (Seoul). Policy Report 2017-12-08.
- Korea Meteorological Administration, Weather Data Open Portal, [accessed 2019 August 22].
<https://data.kma.go.kr/data/grnd/selectAsosRltnList.do?pgmNo=36>
- KW Cho, SH Jung, HM Lee. 2014. Cho et al 2014. Quantitative Study on the National Risk Resulting from Climate Change (I). Korea Environmental Institute. Business Report 2014-03-02.
- Ministry of Environment. 2017. Tools for Establishing a Climate Adaptation Plan in Public Institutes 2016-05.
- National Waterworks Information System, 2017, Water Purification Status [assessed 2019 August 19].
https://www.waternow.go.kr/web/ssdoData/?pMENUID=8&ATTR_5=2
- Seoul Policy Archive, 2015, Tap water supply: Healthy and delicious tap water in Seoul, [assessed 2019 August 19].
<https://seoulsolution.kr/ko/node/3419>
- The Office of Waterworks Seoul Metropolitan Government, 2015, 2030 Basic Plan for Water Service Maintenance. Policy Report 2015-05-11.
- The Office of Waterworks Seoul Metropolitan Government, 2016, Summary of 2020 Seoul Water Demand Management Plan, Policy Report 2016-05.
- The Office of Waterworks Seoul Metropolitan Government, 2018, Production and Supply [accessed 2019 December 1].
http://arisu.seoul.go.kr/c2/sub1_1.jsp
- Water Resources Management Information System, 2016, Water Supply Status by Sector, [assessed 2019 August 19]. http://www.wamis.go.kr/WKS/wks_tpiwsaa_lst.aspx
- YR Kim, GS Kim. 2008. The Seoul Institute, Seoul Water Management Strategy for Climate Change, Policy Report 2008-04-21.