



## Spatial assessment of heat wave and river water quality

Lee, Jiwan<sup>a</sup> · Kim, Sehoon<sup>b\*</sup> · Han, Daeyoung<sup>c</sup> · Shin, Hyungjin<sup>d</sup> · Lim, Hyeokjin<sup>e</sup> · Kim, Seongjoon<sup>f</sup>

<sup>a</sup>Research Professor, Division of Civil and Environmental Engineering, College of Engineering, Konkuk University, Seoul, Korea

<sup>b</sup>Ph.D. Candidate, Department of Civil, Environmental and Plant Engineering, Graduate School, Konkuk University, Seoul, Korea

<sup>c</sup>Master Student, Department of Civil, Environmental and Plant Engineering, Graduate School, Konkuk University, Seoul, Korea

<sup>d</sup>Associate Researcher, Rural Research Institute, Ansan, Korea

<sup>e</sup>Senior Researcher, Korea Institute of Hydrological Survey, Goyang, Korea

<sup>f</sup>Professor, Division of Civil and Environmental Engineering, College of Engineering, Konkuk University, Seoul, Korea

Paper number: 21-052

Received: 21 June 2021; Revised: 5 July 2021; Accepted: 5 July 2021

### Abstract

The purpose of this study is to evaluate the relationship between heat wave and river water quality. The daily maximum air temperature (Tmax) of 91 meteorological stations of the Korea Meteorological Administration and 13 river water quality factors (DO, BOD, COD, TOC, TN, DTN, NH4-N, NO2-N, NO3-N, TP, DTP, PO4-P, Chl-a) of Ministry of Environment were analyzed. The correlation analysis was performed on Tmax and water quality factors, and the determination coefficients ( $R^2$ ) of DO, Chl-a, and TN with Tmax showed high values of 0.782, 0.609, and 0.691 respectively. To analyze the spatial impact between heat waves and water quality factors, the heat wave intensity (HWI) and heat wave duration (HWD) were calculated using the Tmax. The hotspot and spatial statistical analyses were applied for spatial impact evaluation. As a result of hotspot analysis, the heat wave index (HWD, HWI) showed high spatial pattern in the downstream of Nakdong River basin, and Chl-a and TN showed the same pattern. In case of spatial statistical analysis for water quality due to heat wave, the most obvious spatial variability was DO.

**Keywords:** Heat wave, Water quality, Correlation analysis, Hotspot analysis, Spatial statistical analysis

## 폭염과 하천 수질의 공간적 평가

이지완<sup>a</sup> · 김세훈<sup>b\*</sup> · 한대영<sup>c</sup> · 신형진<sup>d</sup> · 임혁진<sup>e</sup> · 김성준<sup>f</sup>

<sup>a</sup>건국대학교 공과대학 사회환경공학부 학술연구교수, <sup>b</sup>건국대학교 일반대학원 사회환경플랜트공학과 박사수로,

<sup>c</sup>건국대학교 일반대학원 사회환경플랜트공학과 석사과정, <sup>d</sup>한국농어촌공사 농어촌연구원 주임전임연구원,

<sup>e</sup>한국수자원조사기술원 조사기획팀 책임연구원, <sup>f</sup>건국대학교 공과대학 사회환경공학부 교수

### 요 지

본 연구는 폭염과 하천수질과의 상관성을 평가하기 위한 것이다. 기상청 91개의 기상관측소의 일 최고기온 과 환경부 수질관측망 918개에 대한 13개의 하천수질인자(DO, BOD, COD, TOC, TN, DTN, NH4-N, NO2-N, NO3-N, TP, DTP, PO4-P, Chl-a)를 대상으로 분석하였다. 최고기온과 수질인자에 대한 상관성 분석을 수행하였으며, DO, Chl-a, T-N의 상관계수( $R^2$ )가 0.782, 0.609, 0.691로 가장 높은 상관성을 나타내었다. 폭염과 수질인자 간의 공간적 영향 분석을 위해, 일 최고기온을 이용하여 폭염강도(heat wave intensity, HWI)와 폭염지속시간(heat wave duration, HWD)를 산정하였다. 공간적 영향 평가는 핫스팟 분석과 공간통계분석을 실시하였다. 핫스팟 분석결과 폭염지수(HWD, HWI)는 낙동강 하류유역에 대해 높은 공간상관성을 나타내었으며 수질인자 중 Chl-a, TN이 동일한 결과를 나타내었다. 폭염에 따른 수질 영향 지역 공간 통계분석 결과 공간적인 변동성이 가장 뚜렷하게 나타나는 수질인자는 DO인 것으로 분석되었다.

**핵심용어:** 폭염, 수질, 상관분석, 핫스팟분석, 공간통계분석

\*Corresponding Author. Tel: +82-2-444-0186

E-mail: ksh91@konkuk.ac.kr (S. Kim)

## 1. 서론

지구온난화에 따른 기후변화로 인해 비롯된 전 지구적인 기온상승은 가뭄, 폭염, 한파 등의 이상기후 현상을 일으켜 인류의 생존을 위협하는 환경 문제로 대두되고 있다(IPCC, 2007). 폭염은 평년보다 대기 기온이 매우 높아 일상생활에 피해가 발생하는 상태로 고온현상이 수일에서 수십 일간 지속되는 상태를 말한다. 우리나라는 여름철 북태평양 기단의 영향으로 고온다습한 기상상태가 발생하는 7월과 8월에 많이 발생하며 폭염은 단순히 고온환경이 지속되는 상태를 넘어 인명 및 재산 피해가 발생한다는 점에서 자연재난으로 분류되고 있다. 기상청 자료에 따르면 2013년에 폭염특보(폭염주의보 및 경보)가 전국에 걸쳐 총 106회 발효되었으나 2017년에는 총 203회로 매년 폭염 발생 건이 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 2018년에는 1973년 관측이후 전국 평균 최고 기온, 폭염 일수 1위를 경신하는 등 유례없는 폭염 사례를 기록하였으며(KMA, 2018), 1901년부터 100년간 국내에서 발생한 각종 재해별 피해분석 결과 인명피해가 가장 크게 발생한 재해는 태풍이나 홍수가 아닌 1994년 발생한 폭염인 것으로 나타났다(Lee and Cho, 2015; Park *et al.*, 2016).

폭염과 수질의 상관성 분석에 대한 선행연구는 대부분 기후변화와 수자원의 변동성 평가에 초점이 맞춰져 있다. 이는 폭염과 같은 극한기상에 대한 하천 수질에 대한 영향은 직접적인 영향보다는 대기기온상승에 따른 수온의 변화로 인해 발생하는 간접적인 영향으로 피해가 발생되기 때문이다. 따라서 폭염과 수질의 선행연구는 대부분 기온과 수온의 변화에 따른 특정 수질인자 변동 특성에 맞춰져 있으며 공간적으로는 담수호에 국한되고 국지적 지역에서의 변동 특성을 분석하는데 그치고 있다. 이는 폭염에 따른 대기 기온상승은 담수의 수온상승을 일으키는 일반적인 인과관계의 결과로 중장기적으로 수질 및 수생태 변화를 야기할 수 있다는 배경을 염두에 두어 연구가 진행되었기 때문이다. 폭염에 따른 여름철 수온 증가는 다양한 수질 문제를 초래할 수 있으며(Wetz and Yoskowitz, 2013) 수질 악화에 따른 정수처리 비용 증가 및 질병 발생과 같은 간접적인 영향이 발생할 가능성이 있다. 특히, 기후변화에 따른 이상기온현상의 발생주기가 빈번해지고 피해가 커짐에 따라 폭염에 따른 하천수질의 변화의 영향을 분석하고 장기적으로 수질변동을 파악하는 필요성이 커지고 있다.

이상고온현상인 폭염이 수자원에 직간접으로 영향을 미치는 국내외 연구사례는 주로 국지적으로 일부 댐상류유역과 보구간에서 강수량과 증발산량 및 하천수질인자들 사이의 상관관계 분석을 통해 수행되었다. Park *et al.* (2020)은 낙동강 주요 지류의 하천수를 대상으로 기온과 수온의 상관성 분석을

탄성도를 이용하여 표현하여 지류의 수온 관리를 위한 방법론 제시 및 지역적 차이를 분석하여 평가하였다. Jiang *et al.* (2014)은 GEMS/Water (The Global Environment Monitoring System for freshwater) 통계자료를 활용하여 전지구적 대규모 하천에서의 수질인자와 기후와의 관계를 탄성도를 이용하여 민감도 분석을 실시하였으며 수질인자별 암모니아와 총인은 기온에 가장 민감도가 높고 아질산염과 오르토인산염은 강수인자에 민감도가 높게 나타나는 분석결과를 도출하였다. 이를 통해 기후변화가 수질에 미칠 수 있는 영향을 전 지구적으로 광범위하게 분석하여 향후 수질인자의 추세분석의 필요성을 강조하였다. Jung and Kim (2017)은 낙동강 중하류 보 구간의 Chl-a와 수질인자와의 상관성을 주성분 분석과 통계기법으로 분석하여 상관관계를 평가하였으며 2012년 1월부터 2016년 10월까지 하절기 자료를 추출하여 상관관계를 분석함으로써 계절적 요인을 고려한 조류발생과 수질인자의 상관성을 평가하였다. Hwang *et al.* (2016)은 팔당댐 상류유역을 대상으로 2012년부터 2015년까지 수문학적요인과 호소수질에 대한 변동성을 조사하여 수질인자의 변동성은 계절적 수문학적인자의 변동성과 관련성을 입증하였다. 또한, Hwang *et al.* (2017)에서는 북한강 의암호의 수질 변동성에 대한 강우수문학적 분석을 수행하여 의암호 유역에서 2012년부터 2015년까지 모니터링한 수질자료와 강수량 및 수문요인의 일 변동 특성에 맞춰 유기물, 질소 및 인의 시공간적 변동을 분석하였다. 이를 통해 수온과 DO의 상관성을 파악하였으며 유기물, 질소, 인 등의 수질인자는 수온과 강수량, 가뭄 및 홍수와 같은 계절적 변동에 영향을 받는 것을 입증하였다.

Van Vliet *et al.* (2008)은 서유럽의 Meuse강에서 극심한 가뭄이 발생한 1976과 2003년의 수질자료를 분석하여 가뭄이 수질에 미치는 영향을 평가하였으며 특히 수질인자를 4가지 그룹으로 분류하여 가뭄과 수온에 따라 상관성을 분석하였다. Joehnk *et al.* (2008)은 남조류로 불리었던 시아노박테리아가 폭염이 발생하는 동안 간접적 영향으로 시아노박테리아의 성장을 촉진시킨다는 분석을 토대로 기후변화가 담수 생태계에 해로운 박테리아에 대한 위협을 증가시킬 가능성이 있다고 경고하였다. 이처럼 폭염 등의 기후변화는 지속적으로 하천 수질에 영향을 끼치는 것으로 보고되어 왔으나, 선행연구의 대부분은 지점자료에 대한 상관성을 분석한 결과로, 공간적인 영향범위나 공간패턴에 대해서는 충분히 토의되지 않았다. 이에 본 연구에서는 폭염에 따른 유역별 하천 수질변동성을 분석하여 폭염으로 야기되는 간접적인 영향이 하천 수질변동성에 어느 정도 영향을 미치는지를 공간적으로 분석하고 그 영향반경을 도출하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 연구대상지역

본 연구는 Fig. 1과 같이 우리나라 전체(101,145 km<sup>2</sup>)를 대상으로 하였다. 우리나라의 기후는 봄, 여름, 가을, 겨울의 4개 뚜렷하게 구분되고 통상 여름(6~8월)은 몬순의 영향으로 강한 강수량이 지속되고 봄(3~5월)과 가을(9~11월)은 이동성 고기압의 영향으로 건조한 특성을 보인다. 겨울(12~2월)은 시베리아 기단의 영향으로 같은 위도에 있음에도 다른 계절에 비해 한랭하다(Baik and Choi, 2015). 지난 106년(1912~2017) 동안 대한민국의 연평균기온은 13.2°C 였으나 2010년대(2011~2017)에 들어 연평균온도는 14.1°C로 온난화가 뚜렷하게 나타나고 있다. 최근 10년 동안은 저온과 관련된 극한 기후 현상이 다소 증가하여 최근 30년간의 추세와 다른 경향을 보였지만, 계절 지속일은 여름이 98일에서 117일로 19일 길어졌으며 겨울은 109일에서 91일로 18일 짧아졌다(KMA, 2018).

### 2.2 폭염지수

기상청은 일최고기온이 33°C를 기준으로 2일 이상 연속될 경우에 폭염으로 정의한다. 여기서 33°C는 한국의 일최고기온의 90 백분위수에 해당하는 수치로 본 연구에서는 Lee and Lee (2016)가 정의한 폭염의 강도를 나타내는 HWI (Heat Wave Intensity)와 폭염의 지속기간을 나타내는 HWD (Heat Wave Duration)를 적용하여 폭염의 공간적인 분포를 살펴보고자 하였다. 폭염 빈도는 분석기간에 대한 각 지상 관측소별 총 폭

염일수로 정의하였으며, 최고기온이 33°C 초과하는 연속일수는 지속시간에 상관없이 하나의 폭염 이벤트로 계산하였다 (Eq. (1)). 또한 HWI는 일최고기온이 33°C를 초과하는 일의 총 합계를 의미하며 Eq. (2)와 같다.

$$HWD = \frac{1}{n} \sum_j I(T_j^{\max} \geq 33^\circ\text{C}) \quad (1)$$

$$HWI = \frac{1}{n} \sum_j (T_{\max} - 33^\circ\text{C})_j, \text{ where } (T_{\max} \geq 33^\circ\text{C}) \quad (2)$$

여기서,  $T_j^{\max}$ 는 j 일에서의 일최고기온, 인수 I는 지표가 참이면 1 아니면 0을 나타낸다. 또한 n은 분석기간의 총 일수이다.

전국 91개의 종관기상관측소에 대해 최고기온을 통해 폭염지수를 산정된 월별 폭염지수(HWD, HWI)는 역거리가중 방법(inverse distance weighted method, IDW)으로 공간내삽하여 2013년부터 2019년까지 4월부터 9월까지의 중권역별로 자료를 생산하였다.

### 2.3 자료수집 및 분석방법

#### 2.3.1 기온자료 및 수질관측자료

본 연구는 Fig. 1(a)와 같이 총 91개의 종관기상관측소에 대하여 2013년부터 2019년까지 총 7년간 4~9월에 대한 일관측 자료를 사용하였다. 중권역별 분석을 위해 지점관측자료를 티센가중평균법을 사용하여 중권역별 유역내 기상관측소에 대한 면적편입비를 산정하였다. 유역별 연평균 최고기온과

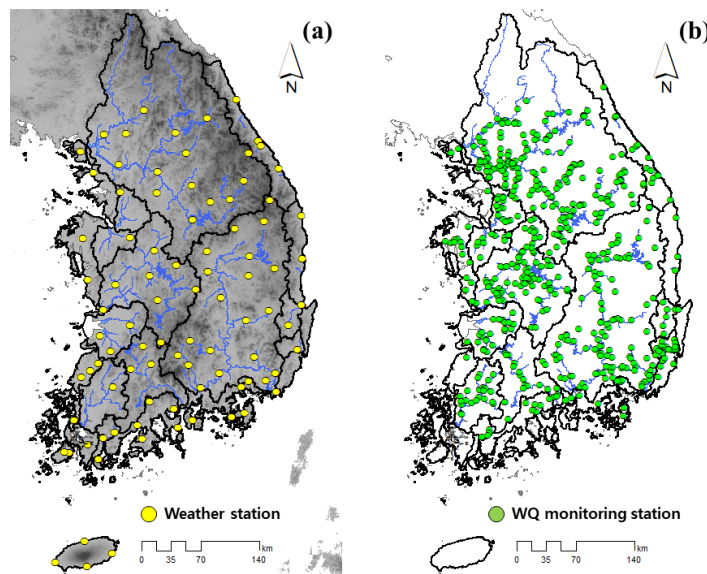


Fig. 1. (a) ASOS weather station, (b) water quality monitoring station

폭염특보 기준인 일최고기온이 33°C 이상을 기록한 폭염이 발생한 일수는 Table 1과 같다. 연평균 최고기온은 한강, 금강 권역이 각각 17.61°C, 18.60°C 였으며, 남부지방인 낙동강, 영산강·섬진강 권역은 19.04~19.41°C로 분포되어 있어 중부지방(한강, 금강권역) 대비 최고 1.8°C 높았다. 연평균 최고기온이 33°C 이상인 폭염일수는 2014년 평균 1.9일로 가장 짧았으며 폭염이 극심했던 2018년에 평균 10.9일로 가장 길었다. 연평균 최고기온이 가장 높은 유역은 낙동강 유역으로 2013년 1월부터 2019년 12월까지 전국 연평균 최고기온인 18.76°C 보다 0.65°C 높았으며 가장 낮은 유역은 한강권역으로 연평균 최고기온보다 1.15°C 낮은 17.61°C로 나타났다.

수질관측자료는 환경부 물환경 측정망 중 하천수질 측정망 자료를 활용하였다. 물환경측정망의 일반지점 및 중권역 대표지점은 12회/년, 주요지점 및 보 지점은 48회/년의 빈도로

측정하고 있으며 수온, 용존산소량, 수소이온농도지수, 전기전도도, 총유기탄소, 총인, 총질소 등을 측정하여 물환경정보시스템(WEIS, 2021; <http://water.nier.go.kr>)을 통해 제공하고 있다. 본 연구에서는 Fig. 1(a)과 같이 폭염에 따른 수질의 변화 양상을 분석하기 위해 물환경정보시스템을 통해 제공되고 있는 전국 918개의 수질측정자료를 수집하였으며, 이 중 중권역별 중복지점과 결측자료를 파악하여 총 561개소의 14개 항목에 대한 수질관측자료를 2013년부터 2019년까지 월 평균 값으로 재가공하여 분석하였다.

Table 2는 권역별 수질자료 현황을 정리한 것으로 여기서 수온은 최고기온과 수온의 상관성을 살펴보기 위해 추가로 분석하였다. 최고기온은 전국에 걸쳐 수질항목에 대한 분석 결과, DO, SS, Chl-a는 영산강권역에 높게 나타나고 인계열 수질인자(DTP, PO4-P, TP)는 낙동강권역에서 평균적으로 높고 영

**Table 1.** The maximum temperature and heat wave day of each watershed

Watershed	2013		2014		2015		2016		2017		2018		2019		Avg.	
	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H
Han	16.73	2.0	17.76	2.2	18.08	2.7	18.05	6.8	17.34	2.8	17.31	9.8	18.00	4.3	17.61	4.4
Nakdong	19.11	7.2	19.07	2.9	19.38	4.2	19.49	8.4	19.64	6.7	19.32	10.8	19.81	4.9	19.41	6.5
Geum	18.04	5.5	18.49	1.9	18.75	3.5	18.88	9.4	18.47	4.0	18.54	12.6	19.01	5.2	18.60	6.0
Seomjin	18.72	6.1	18.83	1.4	19.11	3.7	19.22	8.2	18.97	4.7	19.03	11.5	19.38	3.7	19.04	5.6
Yeongsan	18.87	5.1	18.91	1.2	19.21	2.4	19.36	6.8	19.25	4.9	19.21	10.1	19.21	2.8	19.14	4.8
Avg.	18.29	5.2	18.61	1.9	18.91	3.3	19.00	7.9	18.73	4.6	18.68	10.9	19.08	4.2	18.76	5.5

T: Max. temperature (°C), H: heat wave day

**Table 2.** The water quality monitoring results of 5 river basin

WQ	Han			Nakdong			Geum			Seomjin			Yeongsan		
	Max.	Mean	Min	Max.	Mean	Min	Max.	Mean	Min	Max.	Mean	Min	Max.	Mean	Min
SS (mg/L)	38.6	6.3	0.2	52.6	8.0	0.1	33.2	5.4	0.1	20.6	7.0	0.1	68.0	7.1	0.0
DO (mg/L)	16.3	9.7	0.7	14.7	9.6	0.7	15.7	9.3	0.6	14.3	10.0	1.6	24.8	10.8	0.0
Chl-a (mg/L)	40.9	10.3	0.1	80.6	11.9	0.1	28.7	10.6	0.1	41.3	7.7	0.1	132.6	8.5	0.0
DTP (mg/L)	0.297	0.046	0.008	0.535	0.054	0.008	0.219	0.037	0.013	0.376	0.060	0.026	0.214	0.030	0.000
PO4-P (mg/L)	0.372	0.100	0.006	0.568	0.119	0.003	0.455	0.107	0.004	0.462	0.077	0.018	1.000	0.026	0.000
TP (mg/L)	0.368	0.074	0.015	0.578	0.084	0.013	0.232	0.060	0.022	0.197	0.070	0.038	0.194	0.050	0.000
NH3-N (mg/L)	1.8	0.2	0.0	4.2	0.4	0.0	3.8	0.3	0.0	1.8	0.2	0.0	7.3	0.2	0.0
NO3-N (mg/L)	3.3	1.9	0.6	7.1	2.2	0.8	3.5	1.9	1.0	4.2	2.7	1.1	5.7	2.3	0.0
TN (mg/L)	5.0	2.8	1.0	9.7	3.2	1.2	5.7	2.9	1.9	4.7	3.0	1.7	12.1	3.2	0.0
DTN (mg/L)	5.2	2.4	0.9	576.6	3.1	1.1	5.0	2.6	1.6	6.2	3.4	1.7	11.7	3.6	0.0
COD (mg/L)	8.5	4.8	2.8	12.0	5.2	2.5	7.1	4.2	2.5	8.7	4.8	3.3	17.7	5.0	0.0
TOC (mg/L)	12.0	3.1	1.7	7.5	3.4	1.3	4.8	2.7	1.6	8.8	3.2	1.8	10.4	5.0	0.0
BOD (mg/L)	4.0	1.9	0.7	8.5	2.0	0.7	3.3	1.7	0.7	5.2	1.7	0.8	7.6	1.8	0.0
WT (°C)	30.2	17.0	0.1	29.8	16.6	0.1	28.4	14.9	0.1	28.8	17.2	0.3	33.1	17.7	0.0

WT: water temperature (°C), Max.: maximum, Min.: minimum

산강권역은 낮은 것으로 조사되었다. 질소계열 수질인자(DTN, NH3-N, NO3-N, TN)는 영산강과 낙동강권역에서 평균적으로 높게 나타나고 BOD, COD는 영산강권역에서 높았으며, TOC는 낙동강권역에서 높게 분석되었다. 낙동강권역의 수질 농도가 항목별 높은 것으로 분석되었으며, 특히 영산강권역의 경우는 항목별 수질농도의 변화 폭이 매우 큰 것으로 나타났다.

### 2.3.2 상관분석

본 연구에서는 중권역별 최고기온과 수질인자를 대상으로 다변량 통계분석을 통해 기온과 수질인자 간 특성과 대상 지점에 대한 수질특성을 파악하고 폭염과의 공간분석을 위한 대표 수질인자 선정하고자 하였다. 수질측정망에서 실시간으로 측정되는 수질관측자료를 수집하고 14개 항목에 대해 Pearson's correlation analysis와 Kendall analysis 및 Spearman analysis를 이용하여 상관성 분석을 실시하고 권역별 통계량을 산정하였다.

Pearson's correlation은 두 변수 X와 Y간의 선형 상관관계를 계량화 한 수치로 코시-슈바르츠 부등식에 의해 +1과 -1사이의 값을 가진다. +1은 완벽한 양의 선형 상관관계를 나타내며 0은 상관관계 없음, -1은 완벽한 음의 상관관계를 의미한다. Kendall analysis는 자료의 순위 척도 또는 순위 척도로 변환한 자료를 이용해 두 변수간 상관계수의 크기를 나타내는 값이다. Spearman analysis는 상관관계를 분석하고자 하는 두 연속형 변수의 분포가 심각하게 정규 분포를 벗어난다거나 또는 두 변수가 순위 척도 자료일 때 사용하는 값으로, 연속형 자료일 때는 각 측정값을 순위 척도 자료로 변환시켜 계산한다. Spearman analysis는 Pearson's correlation과 달리 선형적인 상관관계를 나타내지 않고 단순한 한 변수가 증가할 때 다른 변수가 증가하는지 감소하는지에 대한 관계만을 나타내는 비모수적 상관계수이다. 본 연구에서 상관분석은 모두 SPSS (ver. 10)으로 수행하였다.

### 2.3.3 공간통계

폭염과 수질의 공간적인 영향평가를 위해 Getis and Ord (2010)가 제안한  $G_i^*$  핫스팟 분석과 Kulldorff가 제안한 공간 검색통계기법을 이용하였다.  $G_i^*$  통계량은 Z 검정을 통해 통계적 유의성을 판정하는 것으로 높은 값과 낮은 값이 얼마나 집중되어 있는지를 시각화 할 수 있으며, Z 값이 양(+)의 값이면 높은 값의 조사자료들이 공간적으로 군집되어 있는 Hot spot이고 Z 값이 음(-)의 값이면 Cold spot으로 낮은 자료들이 공간적으로 군집되어있다고 판단한다(Getis and Ord, 2010).  $G_i^*$ 의 계산식은 Eq. (3)과 같으며  $\bar{x}$ 는 단위지역  $x_j$ 의 평균, S는  $x_j$ 의 분석을 의미한다.

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{i,j} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n w_{i,j}}{S \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n w_{i,j}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{i,j})^2}{n-1}}} \quad (3)$$

또한 본 연구에서 사용한 Kulldorff (1997)의 공간검색통계기법은 기존의 점패턴분석에서 제시하지 못했던 지역차원의 공간집중패턴을 제시하기 위해 고안된 방법으로 점패턴방식이 아닌 면분석기법의 하나이다. 따라서 개별사건의 위치 정보가 표준단위 구역에 흡수되면서 얼마나 많은 사건이 언제 발생했는가를 파악할 수 있다. 본 연구에서는 Kulldorff에 의해 제안된 SaTScan을 이용하여 분석대상지역 내 폭염이 발생한 확률과 반경 밖에서 발생할 확률의 우도비를 분석하였다. 공간 패턴분석 위해 검출된 각 클러스터에 대해서는 몬테카를로 시험을 이용하여 p값을 산출하였으며 공간 패턴분석을 위한 클러스터링 설계는 Normal Model로 수행하였다.

### 2.3.4 연구방법

본 연구의 방법은 Fig. 2와 같으며, 기상자료는 2013년부터 2019년까지 91개소 종관기상관측소의 일 최고기온자료를 사용하였으며 지점별 자료를 공간내삽하여 폭염이 발생하는 4월부터 9월까지 월별최고기온으로 가공하여 구역별 분석하였다. 하천수질관측자료는 전국 918개 물환경측정망 수질관측자료를 2013년부터 2019년까지 7개년의 8일주기의 관측자료를 수집하여 수질인자간 상관관계분석을 실시하였다. 수집된 수질인자는 수온을 포함하여 용존산소량(DO), 생물화학적 산소요구량(BOD), 화학적산소요구량(COD), 클로로필-a (Chl-a), 질소계열(TN, NO3-N, NH4-N, DTN), 인계열(TP, PO4-P, DTP), 총유기탄소량(TOC), 부유물질(SS) 등 총 14항목이다.

수집된 기상 및 수질 자료를 토대로 전국 5대강 구역별 분석을 위해 월별 폭염강도 및 폭염빈도를 산정하고, 수질관측자료는 수집된 지점별 관측자료를 월 평균자료로 가공하여 5대강 구역 내 중권역별로 재평균 하였으며, 가공된 값을 이용하여 최고기온과 14개의 수질 항목에 대해 상관성 분석 및 주성분 분석을 실시하여 대표수질항목 3종(DO, Chl-a, T-N)을 최종 선택하였다. 수집된 자료를 이용하여 3종의 수질항목과 폭염지수에 대해 Getis-Ord- $G_i^*$ 를 이용하여 수질농도의 변화와 폭염이 집중되는 핫스팟을 도출하고, SaTScan 내 공간통계분석 기법인 normal model을 이용하여 폭염과 수질인자간의 공간적 상관성을 분석하였다.

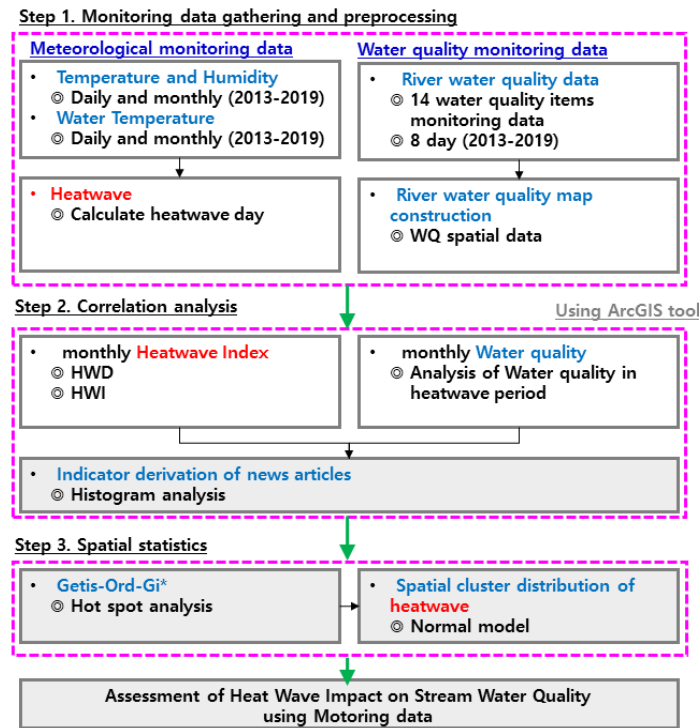


Fig. 2. Flowchart of this study

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 폭염지수 산정결과

본 연구에서는 종관기상관측소에서 수집한 일최고기온으로 월별 폭염빈도와 폭염 강도를 지수화하여 유역별 분석하고 폭염에 따른 수질의 영향 및 뉴스데이터 발생 빈도와와의 상관성 분석을 실시하였다. 이를 위해 폭염일수(HWD), 폭염강도(HWI)의 폭염지수를 기상관측소별로 산정하고 이를 공간내삽하였다. 4~9월에 대한 월별 HWD 및 HWI의 공간분포는 Figs. 3(a) and 3(b)과 같다. 여기서 HWD는 0부터 1의 범위를 갖는 지수로서, 1에 가까울수록 월별 최고기온이 33°C가 넘는 일수의 비로써 폭염일수가 많은 것을 의미하며, HWI는 0 이상의 범위를 나타내는 값으로써 값이 증가할수록 폭염의 강도가 높다. HWD와 HWI는 동일한 패턴으로 폭염을 감지하고 있었으며, 특히 2018년도 7월은 다른 연도에 비해 폭염이 매우 극심했음을 나타내고 있다.

폭염의 강도는 낙동강유역에서 가장 크게 나타났으며, 최고의 폭염일수를 기록한 2018년은 주요 대도시에 두드러지게 폭염이 발생함을 알 수 있었다. 이는 기후적인 요인보다 폭염에 따른 간접적인 요인(전력사용량 증가 등)으로 주요 대도시가 인근 지역보다 폭염강도가 높게 나타나고 있다고 판단된다. 또한, 낙동강유역은 폭염강도가 2018년은 4월부터 나타

나고 5월에는 낙동강중류 중심으로 폭염강도가 발생하다 6월부터 상류유역으로 퍼지고 전국적으로 확산되는 현상을 보이고 있다. 폭염강도는 2014년을 제외한 대상기간에서 8월이 가장 크게 발생하고 있다. 특히, 폭염이 쇠퇴하는 9월부터는 만경-동진강유역 및 영서지방에서 폭염이 일부 관측되었다. 폭염일수를 나타내는 월별 폭염빈도는 전국적으로 2016년 8월이 가장 폭염이 지속된 날이 많았으며 2018년 8월은 폭염강도가 가장 강한 반면 폭염빈도는 7월에 가장 높게 나타났다. 특히 폭염빈도는 8월에 전국적인 폭염이 시작되면 서해안지역에서 폭염빈도가 높은 것을 확인 할 수 있었다.

Table 3은 권역별 HWD와 HWI 평균을 나타낸 것으로 HWD는 2013년부터 2019년까지 권역별로 평균 0.044 ~ 0.240의 범위를 나타내었다. 한강권역은 2018년을 제외하고 가장 낮은 폭염빈도를 나타내었고 전국적으로 폭염빈도가 가장 낮은 해는 2014년 0.044로 나타났으며 2018년에는 폭염빈도가 0.240으로 한 달 평균 약 7일정도 고온현상이 지속된 것으로 분석되었다. 2018년도 권역 전체 평균 HWI는 0.668로 분석 기간 연도 중에서 가장 폭염의 강도가 센 것으로 나타났으며, 평균적으로 폭염강도가 가장 약했던 2014년은 평균 0.045로 나타났다. 종합적으로 살펴보면, 2018년도와 같이 전국적으로 극심한 폭염을 경험한 연도도 있었으나 2014년과 2017년과 같이 지역적으로 폭염의 강도가 유역별로 상이한 연도도

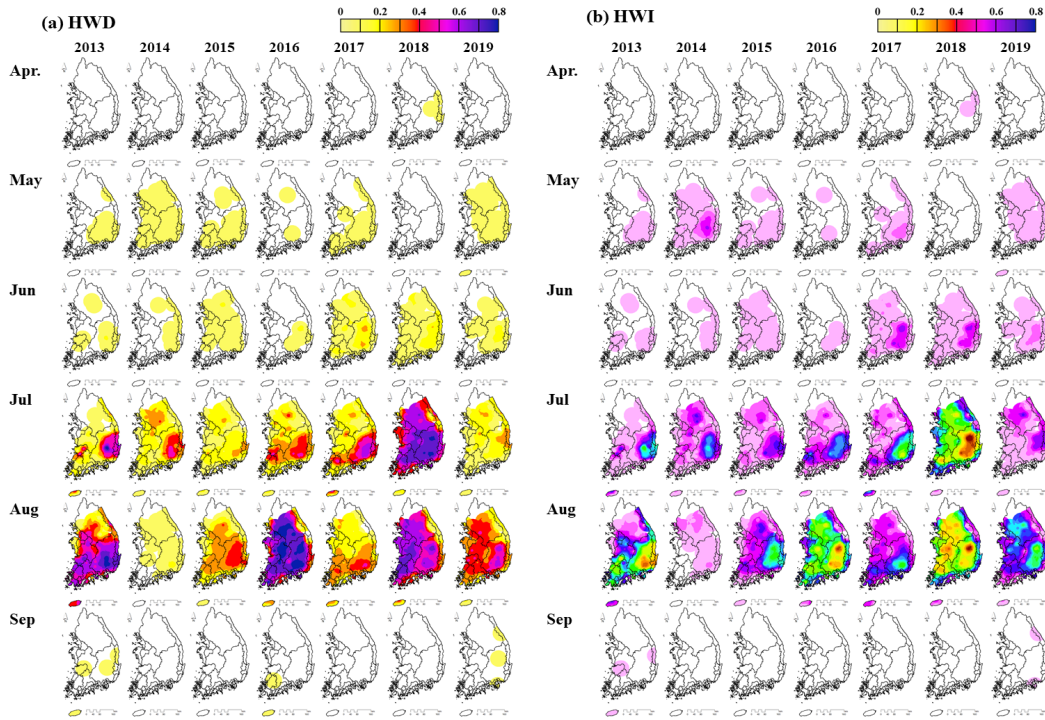


Fig. 3. The results of heat wave index (a) HWD, and (b) HWI

Table 3. The results of average heat wave index for 5 river basin

Component		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Avg.
Han	HWD	0.080	0.052	0.062	0.182	0.069	0.214	0.078	0.105
	HWI	0.088	0.053	0.072	0.355	0.079	0.633	0.119	0.200
Nakdong	HWD	0.180	0.076	0.101	0.207	0.153	0.228	0.088	0.147
	HWI	0.377	0.087	0.209	0.367	0.254	0.688	0.123	0.301
Geum	HWD	0.112	0.046	0.060	0.352	0.079	0.349	0.098	0.157
	HWI	0.139	0.049	0.059	0.421	0.096	0.789	0.111	0.238
Seomjin	HWD	0.113	0.034	0.065	0.241	0.110	0.316	0.074	0.136
	HWI	0.196	0.025	0.060	0.521	0.133	0.605	0.149	0.241
Yeongsan	HWD	0.209	0.046	0.060	0.248	0.117	0.341	0.146	0.167
	HWI	0.481	0.039	0.060	0.550	0.140	0.627	0.124	0.288
Avg.	HWD	0.115	0.044	0.070	0.135	0.106	0.240	0.073	0.112
	HWI	0.182	0.045	0.092	0.320	0.136	0.668	0.090	0.219

있었다. 폭염의 빈도와 강도는 매해 증가하는 추세였으며, 여름철 이외에도 봄 및 초여름에도 폭염 발생이 증가하였으며, 빈도와 강도도 증가하는 추세로 분석되었다.

### 3.2 기온과 수질항목의 상관분석

전국 561개소의 물환경측정망의 수질측정자료 중 총 13개의 수질항목(SS, DO, Chl-a, DTP, PO4-P, TP, NH3-N, NO3-N, TN, DTN, COD, TOC, BOD)과 수온에 대하여 기온과의 상관

성을 분석하였다. 5대강 유역에 대하여 Pearson's Correlation analysis와 Kendall analysis 및 Spearman analysis를 이용하여 분석하였으며 인자간의 유의성은 P-value 값은 0.05를 기준으로 하였고 신뢰구간은 95%로 지정하여 통계분석을 실시하였다.

5대강 권역에 대한 최고기온과 수질항목별 상관분석 결과는 Table 4와 같으며 Pearson 상관분석 결과는 최고기온과 수질인자 중 DO와 질소계열(NH3-N, NO3-N, TN, DTN)은 음

Table 4. Correlation analysis result between maximum temperature and water quality

Water quality	Pearson	Kendall Tau-b	Spearman	R <sup>2</sup>						Select
				Han	Nakdong	Geum	Seomjin	Yeongsan	Avg.	
SS	0.476**	0.364**	0.521**	0.612	0.565	0.498	0.299	0.297	0.454	
DO	-0.839**	-0.670**	-0.861**	0.733	0.730	0.742	0.754	0.952	0.782	○
Chl-a	0.373**	0.266**	0.392**	0.668	0.609	0.688	0.477	0.605	0.609	○
DTP	0.168**	0.177**	0.263**	0.186	0.209	0.182	0.331	0.233	0.228	
PO <sub>4</sub> -P	0.003**	0.019**	0.027**	0.001	0.023	0.000	0.053	0.002	0.016	
TP	0.234**	0.224**	0.331**	0.201	0.257	0.125	0.546	0.107	0.247	
NH <sub>3</sub> -N	-0.154**	-0.098**	-0.152**	0.437	0.229	0.041	0.003	0.268	0.196	
NO <sub>3</sub> -N	-0.383**	-0.314**	-0.471**	0.750	0.729	0.705	0.677	0.683	0.709	
TN	-0.325**	-0.318**	-0.467**	0.731	0.743	0.676	0.620	0.686	0.691	○
DTN	-0.304**	-0.269**	-0.406**	0.744	0.747	0.667	0.612	0.695	0.693	
COD	0.432**	0.322**	0.471**	0.543	0.400	0.606	0.538	0.475	0.512	
TOC	0.390**	0.303**	0.451**	0.541	0.463	0.505	0.523	0.410	0.488	
BOD	0.173**	0.113**	0.175**	0.129	0.042	0.103	0.170	0.002	0.089	
WT	0.929**	0.760**	0.916**	0.893	0.892	0.899	0.940	0.922	0.909	

\*\* P < 0.01, Avg.: verage

의 상관관계를 나타내었으며, 유의성도 -0.839 ~ -0.154로 높은 상관성을 나타내었다. SS와 Chl-a의 상관계수는 각각 0.476, 0.373으로 양의 상관성을 나타내었으며, COD, TOC, BOD도 모두 P value는 0.01 이하로 모두 최고기온과 통계적으로 유의한 결과를 나타내었다. PO<sub>4</sub>-P를 제외한 모든 수질 항목은 최고기온과 통계적으로 유의성이 있는 것으로 분석되었다. 대권역별 최고기온과 수질항목별 상관성 분석결과(R<sup>2</sup>), 전체 권역에 걸쳐 최고기온과 가장 상관성이 높은 것은 수온이었으며, DO와 질소계열(NO<sub>3</sub>-N, DTN, TN) 수질인자와 Chl-a가 상관성이 높은 것으로 분석되었다.

특히 DO와 질소계열은 최고기온이 상승할수록 농도는 감소하는 경향을 나타내었다. DO의 농도는 일반적으로 수면에서 공기 중의 산소가 용해됨에 따라 기온 및 수온의 상승으로 물속의 산소 용해도는 낮아져 DO는 감소하는 음의 상관성을 나타내는 것으로 분석되었다. 질소계열의 경우

Lee et al. (2012)과 Park et al. (2014)의 선행연구에서 TN과 NO<sub>3</sub>-N은 권역 구분 없이 동절기에 높고 하절기에 낮아지는 형태의 수질 변동특성을 나타낸다고 분석하고 있으며, 본 연구에서도 선행연구의 결과와 동일하게 여름철 질소의 농도가 감소한 것으로 나타나 음의 상관성을 나타내고 있음을 확인하였다.

인계열(PO<sub>4</sub>-P, DTP, TP)과 기온의 상관성을 살펴보면, Min et al. (2011)은 물과 토양에서의 인계열과 온도의 영향에 대한 상관성을 분석하였는데, 온도가 증가하면 PO<sub>4</sub>-P가 평

형에 빨리 도달하여 농도가 증가하고 TP는 PO<sub>4</sub>-P와 탁도물질에 포함된 인을 포함하기 때문에 함께 증가하는 경향이 있음을 보고한 바 있다. 온도가 감소함에 따라 물의 밀도가 증가하여 탁도의 농도가 높아져 TP 농도를 증가시키며, 온도가 증가하면 물의 밀도 감소로 인해 탁도는 감소하지만, PO<sub>4</sub>-P의 용출이 증가하여 TP 농도가 증가하게 된다. 이와 동일하게 본 연구에서도 TP와 DTP는 최고기온과 양의 상관관계를 나타내었으나 PO<sub>4</sub>-P는 최고기온과의 상관성이 없는 것으로 분석되었다. 본 연구에서는 수온을 제외하고 최고기온과 상관성이 가장 높게 분석된 DO, Chl-a, TN을 대표 수질인자로 선정하고 수질과 폭염지수간의 공간적 발생 패턴분석을 수행하였다.

### 3.3 공간통계를 이용한 폭염발생에 따른 수질영향 분석

본 연구에서는 인접한 거리와 패턴을 분석하고 그 위치의 속성값 분포를 평가하여 특정한 현상이 공간에 집중 혹은 분산되어 나타내는지 판단할 수 있는 핫스팟 분석을 수행하였다. 이를 위해 ArcGIS spatial analysis의 Hot spot analysis 도구를 이용하여 폭염지수, 뉴스데이터 및 수질항목에 대한 국지적 공간 클러스터링에 대한 분석을 수행하였다. 이 도구는 데이터 셋의 각 사상(feature)에 대해 Getis-Ord Gi\* 통계량을 계산하고 z값과 p값을 이용하여 높은 값 혹은 낮은 값의 사상이 공간적으로 군집을 이루는지를 탐색해준다(Getis and Ord, 2010). Gi\* 통계량은 각 사상별로 z 값을 나타내는데 통계적



으로 유의한 양의 z값일 경우, z 값이 클수록 높은 속성값의 군집 경향이 크며(핫스팟) 통계적으로 유의한 음의 z값의 경우, z값이 작을수록 낮은 속성값의 군집 경향이 크다(콜드스팟). 특히 Gi\* 통계량은 z값 자체가 표준화되는 것으로 z 값이 1.96 이상인 경우 95% 신뢰수준에서 해당 지역과 주변 지역의 변동이 높음을 의미하고, z 값이 -1.96 이하인 경우에는 95% 신뢰수준에서 변동이 낮은 지역을 의미한다.

폭염지수(HWI, HWD)와 3개의 수질인자 자료를 중권역 별로 평균하여 폭염이 크게 나타나는 연도별 7, 8월 자료를 사용하여 분석을 수행하였다. Fig. 4와 Table 5는 평가항목별 핫스팟 분석 결과와 z값을 나타낸 것으로 HWD의 핫스팟은 낙동강권역과 금강, 영산강, 섬진강, 삽교천 상류유역으로 분석되었고 HWI의 핫스팟은 낙동강권역으로 나타났다. DO는 핫스팟은 나타나지 않았으며 Chl-a는 영산강과 섬진강 최상류

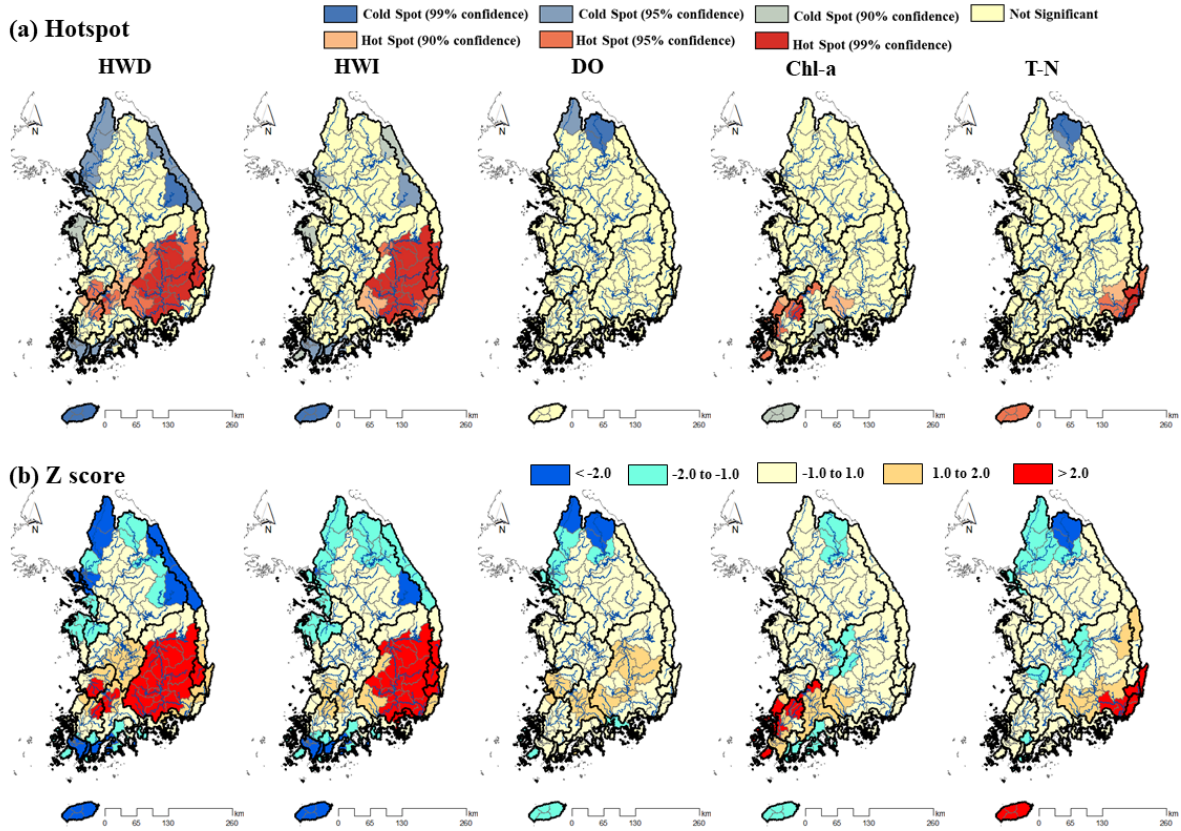


Fig. 4. Spatial distribution of hotspot and coldspot

Table 5. The results of hotspot and coldspot average value and z score

Classification	HWD		HWI		DO		Chl-a		TN	
	Avg.	Z score	Avg.	Z score	Avg. (mg/L)	Z score	Avg. (mg/L)	Z score	Avg. (mg/L)	Z score
Cold spot (99% confidence)	0.06	-3.02	0.06	-2.93	0.00	-3.83	-	-	0.00	-2.67
Cold spot (95% confidence)	0.07	-2.20	0.09	-2.29	0.00	-2.49	-	-	0.00	-2.18
Cold spot (90% confidence)	0.07	-1.87	0.11	-1.77	-	-	1.81	-1.76	-	-
Not Significant	0.13	0.11	0.20	-0.11	7.75	0.28	10.18	-0.06	2.21	-0.21
Hot spot (90% confidence)	0.16	1.79	0.24	1.74	-	-	15.80	1.71	2.35	1.83
Hot spot (95% confidence)	0.16	2.27	0.26	2.17	-	-	14.37	2.28	3.66	2.37
Hot spot (99% confidence)	0.20	3.77	0.42	4.26	-	-	43.62	2.87	4.89	2.82
Avg. Cold spot	0.07	-2.36	0.09	-2.33	0.00	-3.16	1.81	-1.76	0.00	-2.43
Avg. Hot spot	0.17	2.61	0.31	2.72	-	-	23.2	2.28	3.59	2.34

유역이 핫스팟으로 분류되었다. TN은 낙동강하류 유역이 핫스팟으로 나타났다. 종합적으로 살펴보면 폭염지수(HWD, HWI)는 낙동강 하류유역에 대해 높은 공간상관성을 나타내었으며 수질인자는 Chl-a, TN에 대해서는 일부지역 핫스팟을 추출하였으나 지역적으로는 변동성이 뚜렷하게 나타나지 않았다. 핫스팟으로 분류된 지역은 폭염강도도 높게 나타났으나, 수질의 농도도 높은 것으로 나타났다. 특히 Chl-a의 핫스팟 지역 내 평균 농도는 43.62 mg/L로 매우 높게 분석되었으며, TN은 4.89 mg/L로 나타났다.

공간군집화를 통해 공간적 환경요인을 찾아내는 일반적으로 사용되는 방법은 Getis-Ord  $G_i^*$ 와 Moran's I, K-function 등 통계량을 이용하는 방법이 있다. 그러나 이 방법들은 클러스터의 존재 유무에 대한 검정은 가능하지만 그 클러스터의 위치나 크기에 대한 분석에는 한계가 있다(Han and Lee, 2016). 본 연구에서는 Kulldorff(1997)의 스캔통계량을 이용한 공간 클러스터기법을 통해 폭염과 그에 따른 수질 영향 지역 및 반경을 도출하였다.

Fig. 5는 스캔통계량 결과를 도시한 것으로 Chl-a, TN, TP는 반경 60km이내의 공간적 군집을 형성하였다. 폭염에 따른 수질 영향 지역 공간 클러스터분석 결과 공간적인 변동성이 가장 뚜렷하게 나타나는 수질인자는 DO인 것으로 분석되었다. DO는 동해권을 포함하는 낙동강 상류 유역을 중심으로 클러스터가 생성되었는데 Fig. 4(a)에서와 같이 HWD 및 HWI는 금강, 섬진강 및 낙동강 유역을 핫스팟으로 분류하였고 DO는 1.0~2.0 사이의 z score가 산정된 금강, 낙동강 사이에 걸쳐 분포되어(Fig. 4(b)), HWD 및 HWI와 DO에서의 z값이 공통적으로 높은 지역에 대하여 클러스터가 생성된 것으로 판단된다. Fig. 5에서 DO는 폭염지수(HWD, HWI)별 공간검색패턴이 다르게 나타나는데 DO는 Table 4에서와 같이 일 최고기온과 상관성이 매우 큰 인자로서 HWD 및 HWI에 따른 수질 영향 범위가 다른 것으로 나타났다. 반면 Chl-a와 TN은 폭염지수별 검색된 공간패턴이 일정하나 HWD에서 클러스터반경이 작아지는 것으로 보아 HWD에 변동성이 더 강한 것으로 나타났다.

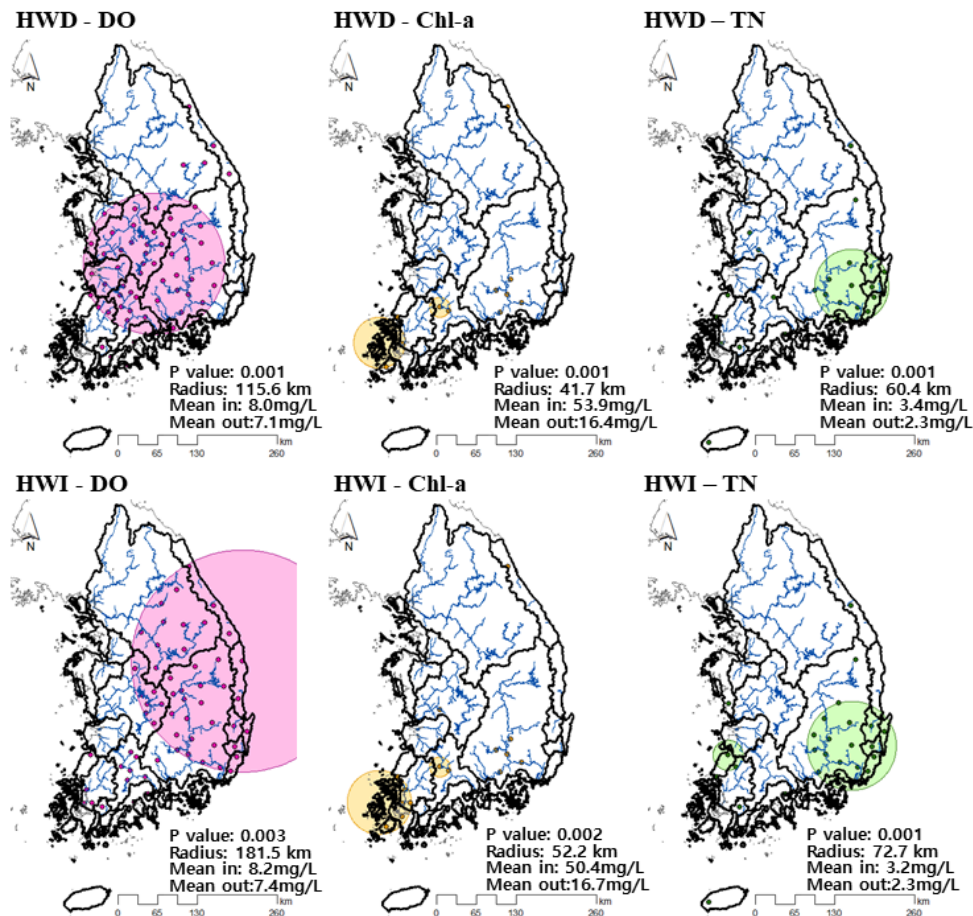


Fig. 5. Locations of detected clusters

## 4. 결론

본 연구는 폭염에 따른 하천수질 영향평가를 수행하는 것으로 폭염에 대한 수질 인자별 영향에 대해 가용한 데이터를 정량적으로 분석하여 인과관계를 공간적으로 분석하고자 하였다. 기상청 기상관측소 91개소에 대한 2013년부터 2019년까지의 일최고기온 자료를 수집하고 이를 폭염지수로 재 가공하였으며, 918개의 환경부 물환경측정망자료를 기반으로 14개의 수질항목에 대해 2013년부터 2018년까지 월 평균자료를 구축하여 유역별 수질특성을 분석하였다. 최고기온과 가장 상관성이 높은 것은 수온이었으며, 용존산소량(DO), 질소계열(NO<sub>3</sub>-N, DTN, TN) 수질항목과 클로로필(Chl-a)이 높은 상관성을 보였으며 DO, TN chl-a를 폭염과 수질의 영향범위를 분석하기 위한 대표수질 항목으로 선정하였다.

수집된 자료를 기반으로 Getis-Ord-Gi\*를 이용한 핫스팟 분석과, SaTScan을 이용한 공간검색클러스터링을 이용하여 폭염 발생에 따른 수질영향분석을 실시하였으며, Getis-Ord-Gi\*를 이용하여 폭염지수(HWD, HWI), 수질인자에 대한 핫스팟분석 결과, 폭염지수(HWD, HWI)와 Chl-a, TN, 에 대해서는 일부지역 핫스팟을 추출하였으나 지역적으로 변동성이 뚜렷하게 나타나지 않았다. SaTScan을 공간통계분석은 특정 지점을 중심으로 원형을 통해 공간집중을 판단하는 Normal model 공간검색통계 모듈을 이용하였으며 입력 변수는 폭염 여부를 판단할 수 있는 Case 데이터와 Attribute 데이터 그리고 뉴스데이터를 가중치로 적용하여 총 3개의 수질인자별 공간 검색분석을 실시하였으며 분석 결과 폭염에 따른 수질의 변동성이 가장 뚜렷하게 나타나는 것은 DO인 것으로 분석되었다.

다만, 하천수질인자는 중권역별 환경요인에 따라 특성이 뚜렷하게 존재하기 때문에 최고기온과 수질인자의 상관성 외에 수문학적 기상인자인 강수량과 하천 방류수와 같은 외부 유입 유량, 환경적 요인인 인구 및 토지이용 등 다각적인 검토가 향후 진행되어 같은 요인으로 묶인 인자들의 요인을 파악할 필요가 있다. 특히 수질농도는 댐 및 보의 직하류인 유수역(riffle)과 직상류인 정수역(pool)에 따라 수질의 특성도 달라짐에 따라 향후 수질 관측지점에 대한 수리학적 특징도 구분하여 분석한다면 유의한 상관성을 추가로 도출할 수 있을 것으로 생각된다. 이를 통해 간접적인 폭염과 관련된 환경요인을 정량적 자료인 수질인자를 통해 유추함으로써 국내 폭염관련 피해를 최소화하고 자연재난인 폭염에 대해 정책적인 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 결과물은 농림축산식품부의 재원 농림식품기술기획평가원의 농업기반및재해대응기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(320051-3).

## References

- Baik, J., and Choi, M. (2015). "Evaluation of remotely sensed actual evapotranspiration products from COMS and MODIS at two different flux tower sites in Korea." *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 36, No. 1, pp. 375-402.
- Getis, A., and Ord, J.K. (2010). *The analysis of spatial association by use of distance statistics. In perspectives on spatial data analysis*. Springer, Berlin, Heidelberg, Germany, pp. 127-145.
- Han, J., and Lee, M. (2016). "Cancer cluster detection using scan statistic." *Journal of the Korean Data and Information Science Society*, Vol. 27, No. 5, pp. 1193-1201.
- Hwang, S.J., Kim, K., Park, C., Seo, W., Choi, B.G., Eum, H.S., and Shin, J.K. (2016). "Hydro-meteorological effects on water quality variability in Paldang reservoir, confluent area of the South-Han River-North-Han River-Gyeong Stream, Korea." *Korean Journal of Ecology and Environment*, Vol. 49, No. 4, pp. 354-374.
- Hwang, S.J., Sim, Y.B., Choi, B.G., Kim, K., Park, C., Seo, W., and Shin, J.K. (2017). "Rainfall and hydrological comparative analysis of water quality variability in Euam Reservoir, the North-Han River, Korea." *Korean Journal of Ecology and Environment*, Vol. 50, No. 1, pp. 29-45.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007). *Climate change 2007-the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC. Vol. 4*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Jiang, J., Sharma, A., Sivakumar, B., and Wang, P. (2014). "A global assessment of climate-water quality relationships in large rivers: An elasticity perspective." *Science of the Total Environment*, Vol. 468, pp. 877-891.
- Joehnk, K.D., Huisman, J.E.F., Sharples, J., Sommeijer, B.E.N., Visser, P.M., and Stroom, J.M. (2008). "Summer heatwaves promote blooms of harmful cyanobacteria." *Global Change Biology*, Vol. 14, No. 3, pp. 495-512.
- Jung, S.Y., and Kim, I.K. (2017). "Analysis of water quality factor and correlation between water quality and Chl-a in middle and downstream weir section of Nakdong River." *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 39, No. 2, pp. 89-96.
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2018). *Comparison of heatwaves in 2018 and 1994*. pp. 4-8.
- Kulldorff, M. (1997). "A spatial scan statistic." *Communications in Statistics-Theory and methods*, Vol. 26, No. 6, pp. 1481-1496.
- Lee, J.E., Choi, J.W., and An, K.G. (2012). "Influence of landuse

- pattern and seasonal precipitation on the long-term physico-chemical water quality in Namhan River Watershed.” *Journal of Environmental Science International*, Vol. 21, No. 9, pp. 1115-1129.
- Lee, N.Y., and Cho, Y.S. (2015). “Estimation of the medical costs incurred by the elderly in Korea due to heat waves and analysis of the causes for expenditure.” *Journal of Environmental Policy and Administration*, Vol. 23, No. 2, pp. 153-172.
- Lee, W.S. and Lee, M.I. (2016). “Interannual variability of heat waves in South Korea and their connection with large-scale atmospheric circulation patterns.” *International Journal of Climatology*, Vol. 36, No. 15, pp. 4815-4830.
- Min, Y.H., Hyun, D.Y., Eum, C.H., Chung, N.H., Kang, S.W., and Lee, S.H. (2011). “A study on relationship of concentration of phosphorus, turbidity and pH with temperature in water and soil.” *Analytical Science and Technology*, Vol. 24, No. 5, pp. 378-386.
- Park, J., Kal, B., and Kim, S. (2020). “Analysis of air-water temperature elasticity taking into account the confidence interval in major tributary of Nakdong River.” *Journal of Wetlands Research*, Vol. 22, No. 3, pp. 178-186.
- Park, J., Sohn, S., and Kim, Y. (2014). “Comparison of characteristics of ammonia nitrogen in streams by watershed characteristics and season.” *Proceedings of the 2014 Spring Co-Conference of the Korean Society on Water Environment and Korean Society of Water and Wastewater*, KSWE, pp. 610-611.
- Park, K.H., Song, B.G., and Park, J.E. (2016). “Analysis on the effects of land cover types and topographic features on heat wave days.” *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 19, No. 4, pp. 76-91.
- Van Vliet, M.T.H., and Zwolsman, J.J.G. (2008). “Impact of summer droughts on the water quality of the Meuse river.” *Journal of Hydrology*, Vol. 353, No. 1-2, pp. 1-17.
- Water Environment Information System (WEIS) (2021). South Korea, assessed 3 May 2021, <<http://water.nier.go.kr>>.
- Wetz, M.S., and Yoskowitz, D.W. (2013). “An ‘extreme’ future for estuaries? Effects of extreme climatic events on estuarine water quality and ecology.” *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 69, No. 1-2, pp. 7-18.