

총 설

통계로 보는 팔당호 물환경 변화

유순주^{a,†} · 이은정^b · 박민지^c · 김갑순^d · 임종권^e · 류인구^f · 최항정^g · 변명섭^h · 노혜란ⁱ

국립환경과학원 한강물환경연구소

Changes in the Water Environment Based on
the Statistical Data in the Lake Paldang

Soonju Yu^{a,†} · Eunjeong Lee^b · Minji Park^c · Kapsoun Kim^d · Jongkwon Im^e · Ingu Ryu^f ·
Hwangjeong Choi^g · Myeongseop Byeon^h · Hyeran Nohⁱ

Han-river Environment Research Center, National Institute of Environmental Research

(Received 24 October 2018, Revised 12 November 2018, Accepted 12 November 2018)

Abstract

Since the 1970s regulations against the pollution of drinking water have been introduced in Lake Paldang watershed area. To understand the effects of water environment management policies and the impacts of climate changes on Lake Paldang, a long-term comprehensive study of this watershed and the changes in its water environment is required. In this study, we analyzed changes in the weather, hydrology, sources of pollution, water quality, and algal development from 2000 to 2015 year based on the statistical data provided by several national information systems. While the population and amount of sewage in the Lake Paldang watershed increased by about 1.5 times, the amount of animal manure showed a decreasing trend during the same period. The wastewater also increased by about 1.5 times while the amount of water intakes rose by about 1.14 times. The water quality in front of the Paldang Dam, which is the representative monitoring site of the Lake Paldang, was stable. The annual average BOD concentration remained within 2 mg/L, which is a “Good (Ib)” level according to the environment standards of Republic of Korea. The development of phytoplankton and harmful cyanobacteria were largely influenced by meteorological factors.

Key words : Algae, Paldang Watershed, Water Pollutant load, Water Quality

^{a,†} Corresponding author, 소장(Director), ysu4205@naver.com, <https://orcid.org/0000-0002-1860-131X>

^b 환경연구사(Researcher), ejay@korea.kr, <https://orcid.org/0000-0002-7260-1900>

^c 환경연구사(Researcher), iamg79@korea.kr, <https://orcid.org/0000-0002-2003-8511>

^d 환경연구사(Researcher), ks5825@korea.kr, <https://orcid.org/0000-0001-5089-3474>

^e 환경연구사(Researcher), limjkk80@korea.kr, <https://orcid.org/0000-0003-3994-5127>

^f 환경연구사(Researcher), ilovmi@korea.kr, <https://orcid.org/0000-0002-7491-3000>

^g 박사후연구원(Postdoctor), choihj8218@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5324-3098>

^h 환경연구관(Researcher), zacco@korea.kr, <https://orcid.org/0000-0003-0997-2415>

ⁱ 환경연구관(Researcher), anran1@korea.kr, <https://orcid.org/0000-0002-7188-4841>

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. Introduction

팔당호는 1973년 남한강, 북한강, 경안천이 합류하는 지점에 팔당댐을 건설하여 생긴 인공호로 수도권 2,500만 시민을 위해 상·하류에서 일 평균 8백만 톤 이상의 물을 취수하여 정수장으로 공급하는 매우 중요한 대규모 상수원이다. 팔당호 유역은 북한강 수계와 남한강 수계, 경안천 유역으로 나뉘며, 북한강 수계에는 평화의 댐, 화천댐, 춘천댐, 소양강댐, 의암댐, 청평댐이 위치하고 있고 남한강 수계에서도 충주댐과 함께 2012년 이후 강천보, 여주보, 이포보가 건설되어 운영되고 있다. 이러한 대형 댐 및 수리 구조물의 영향과 팔당호의 형태학적 특징(하천형 호수 등)으로 팔당호의 수리 수문학적 특성은 매우 다양하고 복잡한 양상을 나타낸다.

우리나라 물환경 관리정책은 1989년 ‘맑은 물 공급 종합대책’을 시작으로 하수처리장 등이 건설되었고 이후 1990년 7월에 팔당호·대청호 지역을 특별대책지역으로 지정하는 계획을 수립하였다. 하지만 1990년대 후반에 들어서 4대강 식수원 문제 등 물 관련 현안이 끊이지 않고 팔당호를 비롯한 4대강 수질이 개선되고 있지 않자 2002년에 ‘4대강 물관리 종합대책’을 마련하여 오염총량관리제도, 수변구역제도, 물이용 부담금 제도, 상수원지역 주민지원 및 토지매수 제도 등 강력한 물관리 정책이 도입되었다. 팔당호 유역은 수도권 상수원으로서의 중요성이 크기 때문에 댐 완공 후 1975년 상수원 보호구역, 1982년에는 자연보전구역, 1990년 수질보전 특별대책지역, 1999년에는 수변구역이 지정되는 등 오염원 입지 제한 정책으로 적용되어 왔다. 이후 유역관리에 기반을 둔 팔당호 등 한강수계 수질관리 특별종합대책이 추진되고 「한강수계 상수원 관리 및 주민지원에 관한 법률」(한강수계법)이 통과한 2000년대부터 수질 관리에 획기적인 대책이 추진되었다. 2004년 경기도 광주시에서 수질오염총량관리제도를 실시하면서 2008년 국가경쟁력강화위원회에서 수질관리정책 개선이 추진되어 입지규제 중심에서 환경기술의 발전을 고려한 배출, 총량규제 중심으로 전환하여 2013년에 한강수계에서 수질오염총량제도가 의무제로 실시되고 있다(HERC, 2015).

이와 같이 팔당호는 댐이 1973년 완공된 이후 45년 동안 다양한 수질보전 정책과 제도가 복합적으로 적용되어 왔다. 그러나 수도권 개발과 함께 인구 증가 및 토지이용 변화 등 유역환경 변화는 여전히 지속되고 있다. ‘팔당상수원보호 종합대책에 관한 연구’(NIER, 1989)에서 부영양화 주요인자인 총인을 대상으로 유입부하량이 연간 1,138,894 kg로 유입천에 의한 부하량이 91.8%이고 수생대형생물, 저질에 의한 부하량이 각각 5.0%, 3.1%, 강우에 의한 부하량이 0.2%로 추정한 바 있으며 2015년 팔당호 수질보전 특별대책지역에 대한 유역환경변화 현황을 조사한 바 있다(HERC, 2015). 최근 기후변화로 인한 다양한 현상이 발생하고 있는 가운데 물환경에도 영향을 미치고 있지만 종합적으로 장기간에 걸쳐 팔당호 유역 환경 및 물환경 변화를 조사 평가한 사례는 많지 않다. 점차 기후변화의 폭이 커지는 상황

에서 최근 30년 평균기온이 20세기 초(1912년~1941년)보다 12.6°C에서 14.0°C로 1.4°C 상승하였고 최근 10년 평균 기온은 14.1°C로 증가하는 경향을 보이며 여름이 길어지는 반면 겨울은 짧아지고 여름의 열대야도 증가하는 추세에 있다. 강수량은 최근 10년 동안 약한 강수가 증가한 반면 강한 강수가 감소하여 과거와 다른 경향을 보이고 있다(NIMS, 2018).

따라서 본 문에서는 팔당호 유역에 대하여 그간 추진해 온 물환경 관리정책 추진에 따른 효과와 기후로 인한 물환경 변화를 이해하기 위하여 국가통계자료인 기온과 강수를 비롯한 기상자료와 함께 수자원과 수질 및 조류 등을 중심으로 물환경관리 정책이 종합적으로 추진되어온 시기인 2000년부터 2015년까지 기상·수문 변화, 오염원 변화와 함께 수질 및 조류 발생 현황을 비교 분석하였다.

2. Material and Methods

2.1 기상 및 수문 변화

기상 자료는 경기도 양평군에 위치하고 있는 양평기상관측소에서 관측한 기온과 강수량 자료를 이용하였다(KMA, 2018). 팔당호 수문은 북한강의 경우 청평댐 방류량, 남한강은 여주대교 유량, 경안천은 경안교 수위관측소 자료에 근거한 유량을 근거로 분석하였으며 팔당호로 유입되는 이들 3개 하천의 장기 수문자료를 조사하였다(Fig 1).

2.2 오염원 변화 및 현황

팔당호에 직접 유입되거나 영향을 미치는 유역인 “팔당상수원 수질보전 특별대책지역” 대상 경기도 5시 2군(광주시, 여주시, 이천시, 용인시, 남양주시, 양평군, 가평군)을 중심으로 정리하였다. ‘팔당·대청호 상수원 수질보전 특별대책지역 환경자료(2016.12)’를 토대로 특별대책지역의 인구, 가축, 산업 등의 오염원 변화를 살펴보았다. 특별대책지역의 팔당호 유역 상수원보호구역, 특별대책지역 등에 대한 행정 구역 구분은 Fig. 2와 같다(Me, 2016b).

2.3 수질 및 조류 변화

팔당호 수질은 남한강과 북한강, 경안천에 위치한 수질측정지점 중 팔당호와 가장 인접한 강상(남한강), 삼봉리(북한강), 경안천5A(경안천)와 팔당호 내 팔당댐2(댐앞) 지점의 자료로 비교하였다(Table 1). 수질 자료는 물환경측정망 운영계획에 근거한 수질측정망 자료로 수질항목은 수온, pH, 생물화학적산소요구량(BOD), 화학적산소요구량(COD), 부유물질(SS), 총질소(T-N), 총인(T-P), Chl-a, 총유기탄소(TOC)를 중심으로 2000년부터 2015년까지 자료를 이용하였다. 유입오염부하량은 남한강의 경우 여주대교 지점의 유량과 수질로 산정하였고 북한강은 청평댐 방류량과 삼봉리 지점의 수질자료, 경안천은 경안교 유량과 경안천5지점의 수질자료를 이용하여 산정하였다(ME, 2018).

조류 발생 현황은 조류경보제 대상지점인 팔당댐앞, 월계사앞(2016년부터 부용사앞으로 변경), 삼봉리(2012년 지점

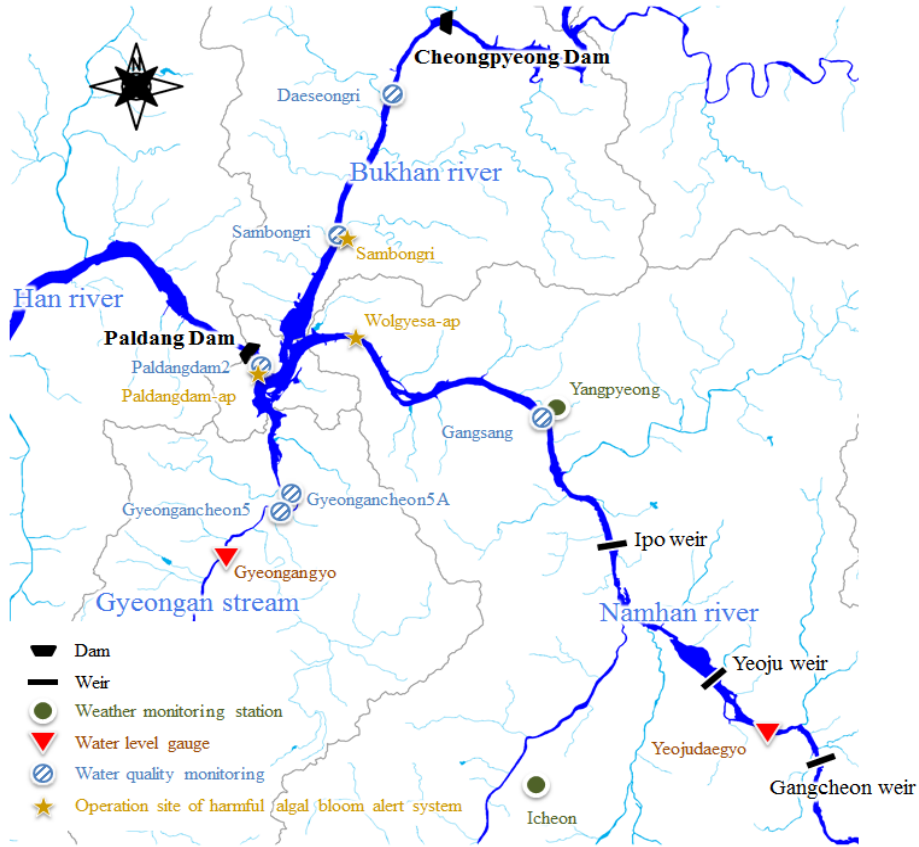


Fig. 1. Hydraulic structures, weather stations, water gauging stations and monitoring points around the Lake Paldang.

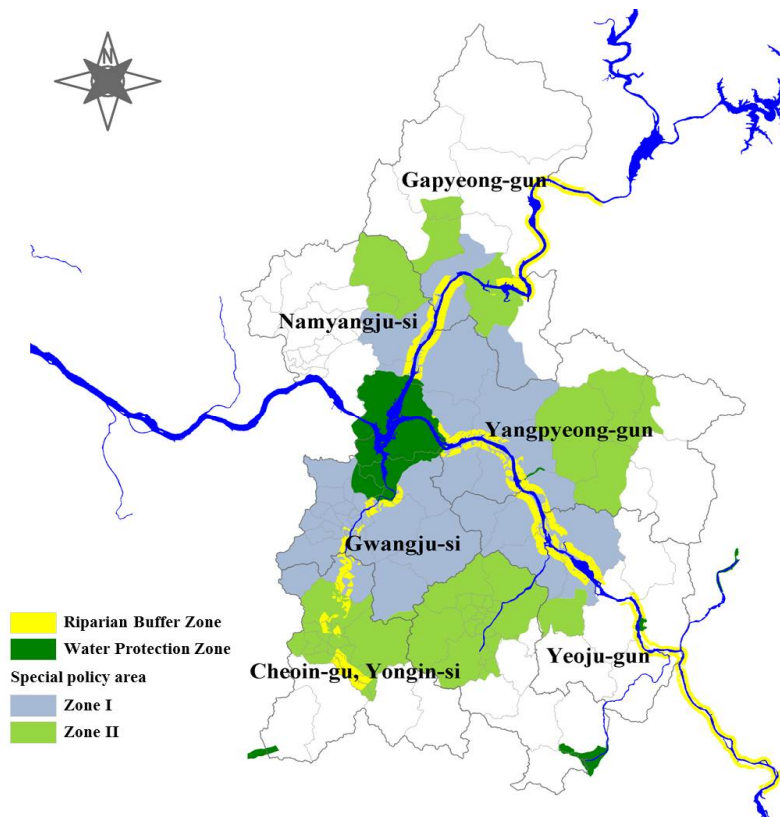


Fig. 2. Special measures areas for the preservation of water quality in the Lake Paldang.

Table 1. Location of water quality measuring network and algae alert system in the Lake Paldang

Classification		Site name	Address
Water quality measuring network	Lake Paldang	Paldangdam2	Neungnae-ri, Joan-myeon, Namyangju-si, Gyeonggi-do
	Bukhan River	Sambongri	Sambong-ri, Joan-myeon, Namyangju-si, Gyeonggi-do
	Namhan River	Gangsang	Gyopyeong-ri, Gangsang-myeon, Yangpyeong-gun, Gyeonggi-do (Yangpyeong bridge)
	Gyeongang stream	Gyueongancheon5A	Seoha-ri, Chowol-myeon, Gwangju-si, Gyeonggi-do (Seoha weir)
Algae alert system	Lake Paldang	Paldangdam-ap	Neungnae-ri, Joan-myeon, Namyangju-si, Gyeonggi-do
	Bukhan River	Sambongri	Sambong-ri, Joan-myeon, Namyangju-si, Gyeonggi-do
	Namhan River	Wolgyesa-ap ¹⁾	Sinwon-ri, Yangseo-myeon, Yangpyeong-gun, Gyeonggi-do

1) Chang to Buyongsa-ap from 2016

추가) 등 3개 지점에서 규조류, 녹조류, 남조류(유해남조류 포함), 기타조류의 세포수를 2002년부터 2015년까지 조사한 자료를 정리하였다(HERC, 2016). 현재 조류경보제는 2010년 이전까지는 조류예보제였으며 2015년까지 표층을 대상으로 한 것이다.

월평균 기온 중 가장 높게 나타났다. 일반적으로 조류가 대량 증식하기 시작하는 7월의 월평균 기온이 가장 높았던 해는 2000년으로 26.1 °C이고 다음이 2010년 25.7 °C였다.

3. Results and Discussion

3.1 기상 및 수문 변화

3.1.1 기온 및 강수량

양평 기상관측소의 평년(1981~2010년) 평균기온은 11.5 °C이고, 2000년에서 2015년까지 평균기온은 11.9 °C로 평년에 비해 0.4 °C 높았으며 Fig. 3과 같이 연도별 평균기온이 소폭 상승하는 경향을 보였다. 우리나라는 지난 106년간의 연평균 기온 변화량을 보면 +0.18 °C/10년으로 상승하였는데 최고 기온은 +0.2 °C/10년, 최저 기온은 0.24 °C/10년으로 상승하였으며 여름일수와 열대야일수도 각각 +1.2 일/10년과 +0.9일/10년으로 증가하는 추세에 있다(NIMS, 2018). Table 2와 같이 연평균 기온이 가장 높은 해는 2015년 12.9 °C였으며 일 최고 기온은 보인 해는 2012년 37.0 °C였다. 일 평균기온이 25 °C 이상 연속되는 일수가 많은 해는 2012년으로 24일간 지속되었으며 2013년부터 2015년까지 25 °C 이상 연속일수가 15일 이상을 유지하였다. 2011년의 경우는 25 °C 이상 연속일수가 7일에 불과하였으나 Table 3과 같이 11월 월평균 기온이 9.6 °C로 11월

Table 2. Annual temperature status at the Yangpyeong weather station

Year	Average annual temperature (°C)	Minimum temperature (°C)	Maximum temperature (°C)	Consecutive days above 25 °C
2000	11.6	-15.1	35.0	10
2001	11.7	-21.8	35.4	8
2002	11.7	-19.1	35.2	9
2003	11.8	-20.2	33.4	6
2004	11.8	-17.7	35.4	18
2005	11.4	-17.1	35.2	9
2006	12.4	-15.1	35.5	11
2007	12.5	-13.1	34.0	12
2008	11.8	-14.9	35.0	14
2009	11.9	-18.7	34.2	7
2010	11.5	-21.7	34.2	17
2011	11.3	-20.9	35.5	7
2012	11.4	-21.4	37.0	24
2013	11.8	-20.6	34.2	15
2014	12.5	-14.5	35.0	15
2015	12.9	-13.5	36.1	18

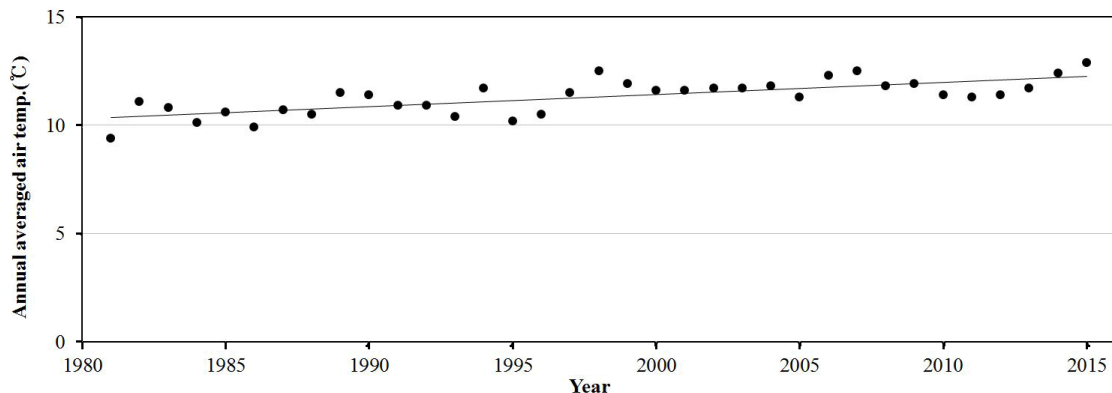


Fig. 3. Mean annual temperature change in the Yangpyeong weather station.

Table 3. Average monthly temperature at the Yangpyeong weather station

(unit: °C)

Year \ Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Average
2000	-2.6	-2.4	5.2	11.0	17.3	23.0	26.1	25.2	18.9	12.7	4.7	-0.4	11.6
2001	-5.0	-1.3	4.2	12.6	18.7	22.5	25.3	25.4	20.6	14.2	4.3	-2.3	11.7
2002	-1.5	0.6	7.1	13.2	17.6	21.5	25.0	23.7	19.6	10.9	2.3	-0.1	11.7
2003	-4.6	0.8	5.5	12.3	18.4	21.3	23.6	24.0	20.2	11.8	8.4	-0.9	11.8
2004	-3.7	1.2	5.2	12.0	17.0	21.9	24.1	24.5	19.9	12.6	6.8	0.4	11.8
2005	-3.6	-2.4	3.9	12.7	16.8	22.3	25.1	24.5	21.3	13.0	6.8	-4.8	11.4
2006	-1.1	0.0	5.3	11.7	18.3	21.8	23.2	26.3	19.4	15.8	7.0	-0.1	12.4
2007	-1.0	2.7	5.9	11.5	17.9	22.7	24.0	25.5	20.8	14.0	5.0	0.4	12.5
2008	-2.3	-2.4	5.6	12.6	16.7	21.1	25.6	24.7	20.7	14.2	5.7	-0.5	11.8
2009	-4.4	1.7	6.0	12.1	18.5	22.3	23.9	24.7	20.1	13.7	5.9	-2.1	11.9
2010	-6.1	0.6	4.3	9.6	17.4	22.9	25.7	26.2	20.9	13.1	4.8	-2.4	11.5
2011	-8.4	0.0	3.6	10.5	17.4	22.1	24.7	25.4	20.3	12.1	9.6	-1.5	11.3
2012	-3.6	-2.5	5.2	12.1	18.6	23.7	25.4	26.4	19.4	12.9	4.4	-5.2	11.4
2013	-5.1	-1.5	5.2	9.9	17.9	23.7	25.5	26.4	20.4	14.2	4.9	-1.4	11.8
2014	-2.0	1.2	7.3	13.6	18.6	22.8	25.6	24.3	20.4	13.6	6.9	-3.6	12.5
2015	-1.6	0.6	6.0	12.8	18.9	23.2	25.4	25.6	20.4	13.7	8.5	0.8	12.9
Average	-3.5	-0.2	5.3	11.9	17.9	22.4	24.9	25.2	20.2	13.3	6.0	-1.5	11.9

Table 4. Monthly precipitation at the Yangpyeong weather station

(unit: mm)

Year \ Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total
2000	56.1	2.5	2.0	26.7	75.0	109.0	139.0	356.0	139.5	11.5	22.5	19.8	959.6
2001	32.2	48.3	10.2	16.0	14.5	170.0	577.5	56.0	20.0	71.5	7.0	10.9	1,034.1
2002	38.8	2.8	23.5	163.5	85.5	76.5	189.0	646.5	23.5	65.0	5.1	13.4	1,333.1
2003	15.4	49.8	29.5	176.5	104.0	133.5	444.5	399.0	374.5	42.0	48.5	8.6	1,825.8
2004	17.6	64.0	17.7	64.0	139.5	154.5	496.0	164.0	155.0	3.0	49.5	23.0	1,347.8
2005	5.5	21.6	28.9	89.0	69.0	296.5	301.0	535.0	277.0	54.5	44.0	10.6	1,732.6
2006	41.2	15.7	16.4	71.0	119.5	250.0	940.5	105.0	12.0	29.5	58.0	12.0	1,670.8
2007	7.0	25.0	135.4	26.0	147.0	55.0	265.0	368.5	292.0	25.0	47.4	9.4	1,402.7
2008	14.1	8.1	63.1	35.3	90.0	187.0	616.8	229.8	94.7	40.0	18.0	23.5	1,420.4
2009	1.9	40.2	60.6	54.6	100.1	111.8	778.5	268.9	33.5	56.5	50.6	19.3	1,576.5
2010	28.7	50.1	86.2	64.5	100.5	95.2	257.3	525.5	620.3	32.5	25.0	16.7	1,902.5
2011	4.0	37.4	20.2	140.1	78.6	407.0	1,058.3	278.8	63.9	43.8	55.7	10.7	2,198.5
2012	7.5	0.0	43.4	152.5	33.7	102.9	368.5	461.0	159.1	87.1	69.9	46.4	1,532.0
2013	27.5	66.0	50.6	71.3	126.1	87.7	743.3	193.4	205.1	17.3	72.9	21.9	1,683.1
2014	16.6	18.0	11.7	31.6	60.0	97.0	158.3	205.6	76.6	65.1	36.2	13.4	790.1
2015	13.5	22.5	9.5	96.1	34.1	84.1	212.6	80.3	35.9	56.5	126.7	29.7	801.5

평년 연강수량은 1,438.2 mm이나 2000년~2015년 평균 연강수량은 1,450.7 mm로 평년에 비해 12.5 mm 상승하였다. 2011년 연강수량이 2,198.5 mm로 가장 많았으며, 2014년 790.1 mm로 가장 적었다(Table 4). Table 5와 같이 6시간 무강우 기준으로 구분하여 강우사상별로 분석한 결과 2002년 강우사상별 누적 강수량이 465.0 mm로 가장 많았으며 강우 횟수는 2010년 115회로 다른 해에 비해 많았다. 강우 횟수는 증가하는 추세이나 30 mm 이상 횟수는 2014년과 2015년은 8회와 5회로 낮았다. 무강우 연속일수가 가

장 길었던 해는 2012년으로 29일이고 25 °C 연속일수도 24일간 지속되었다. 무강우 연속일수가 다음으로 긴 해는 2014년 26일과 2008년 25일로 나타났다. 여름철 무강우 연속일수의 증가는 기온 증가 요인과 관계가 깊다.

3.1.2 수문

수문은 강수량에 영향을 받기 때문에 연강수량이 2,198.5 mm로 가장 많은 2011년에 팔당댐 유입량도 867.7 m³/s로 가장 많았으며 2014년과 2015년은 연 강수량이 각각 790.1

Table 5. Annual precipitation status at the Yangpyeong weather station

Year	Storm event accumulated precipitation (Max, mm)	Event (Number)	Event above 10 mm (Number)	Event above 30 mm (Number)	Consecutive dry days
2000	121.5	80	21	9	19
2001	182.5	75	16	8	21
2002	465.0	79	22	10	13
2003	182.5	95	37	19	16
2004	196.5	78	28	12	18
2005	272.0	83	29	18	19
2006	445.0	79	23	10	21
2007	110.5	109	37	13	22
2008	217.5	95	25	15	25
2009	244.5	83	29	12	22
2010	215.6	115	45	14	23
2011	353.0	94	31	17	23
2012	168.5	89	25	16	29
2013	174.5	99	39	15	18
2014	92.0	89	19	8	26
2015	129.5	85	23	5	19

mm와 801.5 mm로 평균 유입량도 각각 232.3 m³/s, 176.2 m³/s로 연속하여 낮게 나타났다(Table 6). 이에 따라 연평균 체류시간이 가장 긴 해도 2015년이며 15.5일이었다. Table 7과 같이 북한강의 청평댐 평균 방류량은 71.4 ~ 325.2 m³/s이고 남한강 여주대교 유량은 80.5 ~ 584.4 m³/s, 경안천은 3.17 ~ 15.75 m³/s 였다. 남한강 여주대교 이후의 양화천, 북하천과 흑천 등과 북한강 유입부의 벽계천, 묵현천 등으로 부터 유입량이 포함되지 않은 대략적인 남한강

과 북한강의 유량 비로 볼 때 평균 1.43 정도이고, 남한강 유량이 많은 경향을 보이며 유량 비의 범위는 0.66 ~ 2.10 이었다. 2000년과 2001년에는 유량 비가 각각 0.85, 0.66에서 2003년에 들어 2.02로 증가하면서 남한강 유량이 증가한 것처럼 보였다. 이는 북한 최대 저수량 9억천만톤 규모의 임남댐이 1999년 1월 공사 후 2000년 10월 완공되었으나 2002년 댐 상층부 균열과 훼손으로 2003년 12월에 재 완공되면서 유량 변화가 있는 것으로 판단된다.

Table 6. Mean annual inflow, outflow and flow duration in the Lake Paldang

(unit: m³/s)

Year	Inflow	Drought flow	Low flow	Base flow	High flow	Outflow	Residence time
2000	485.5	147.0	205.0	277.0	354.0	485.4	8.6
2001	311.9	107.0	128.0	151.0	202.0	312.1	14.1
2002	467.1	88.0	131.0	193.0	317.0	466.4	12.1
2003	756.2	120.2	190.6	256.2	753.5	763.8	8.2
2004	612.9	131.8	194.7	259.8	488.3	613.1	8.5
2005	593.7	148.3	203.8	313.4	603.9	555.1	9.1
2006	688.9	144.7	170.2	210.7	425.9	650.8	12.3
2007	620.1	158.6	209.2	300.4	499.9	585.4	8.9
2008	408.4	108.0	154.7	208.4	313.3	408.4	10.7
2009	491.9	125.9	169.3	206.6	330.3	456.8	12.6
2010	573.9	161.2	227.4	351.4	505.5	560.4	7.9
2011	867.7	112.8	171.1	231.4	618.3	867.9	9.1
2012	491.2	119.3	198.1	272.8	429.0	477.6	8.4
2013	607.5	145.6	228.2	343.4	470.1	607.1	7.4
2014	232.3	123.5	176.4	203.1	248.4	232.6	11.1
2015	176.2	94.1	127.0	150.8	183.5	176.6	15.5
Maximum	867.7	161.2	228.2	351.4	753.5	867.9	15.5
Minimum	176.2	88.0	127.0	150.8	183.5	176.6	7.4
Average	524.1	127.3	180.3	245.6	421.4	513.7	10.3

Table 7. Inflow ratio of Namhan river to Bukhan river

Year	Namhan river (m ³ /s) ¹⁾	Bukhan river (m ³ /s) ²⁾	Namhan river / Bukhan river
2000	177.2	209.3	0.85
2001	105.5	160.2	0.66
2002	246.8	188.0	1.31
2003	584.4	289.5	2.02
2004	367.0	224.9	1.63
2005	288.3	194.0	1.49
2006	430.9	243.0	1.77
2007	375.7	222.2	1.69
2008	422.9	201.2	2.10
2009	213.3	218.2	0.98
2010	257.4	218.0	1.18
2011	484.2	325.2	1.49
2012	281.2	169.8	1.66
2013	273.5	271.5	1.01
2014	136.1	93.1	1.46
2015	80.5	71.4	1.13
Average	295.4	206.2	1.43

1) Flow of Yeosu bridge, 2) Outflow of Cheongpyeong-dam

3.2 오염원 변화

3.2.1 팔당호 상수원 수질보전 특별대책지역 지정 현황

2015년 기준 팔당호 상수원 수질보전 특별대책지역(이하 특별대책지역)의 전체 면적은 2,096.5 km²으로 Table 8과 같이 경기도 남양주시, 용인시, 이천시, 광주시, 여주시와 가평군, 양평군 등 5시 2군이 포함된다. I 권역 면적은 1,271.6 km²이며 II 권역 면적은 824.9 km²이다. 시·군별 면적 분포는 양평군이 591.7 km²(28%)로 가장 많고, 다음으로 광주시(21%), 여주시(12%), 이천시(11%), 용인시(10%), 남양주시(9%), 가평군(9%)의 순이다. 전체 면적에서 도시지역이 28.4%, 관리지역 32.6%, 농림지역과 자연환경보전지역은 각각 36.9%와 2.1%를 차지하고 있다.

3.2.2 인구 및 생활오수 발생량

2015년 기준 특별대책지역의 총인구는 918,632명으로 광주시가 가장 많은 312,579명이고 전체의 34%를 차지하며 다음으로 용인시(20%), 이천시(18%), 남양주시(12%), 양평군(11%), 여주시(3%), 가평군(2%)의 순이다. 인구밀도는 용인시가 가장 높은 882명/km²이고 여주시가 가장 낮은 101명/km²로 시·군 간 차이가 크다(Table 9).

연도별 인구와 생활오수 발생량의 변화를 보면 전반적으

Table 8. Status of the special measures areas in the Paldang watershed

(unit: km²)

Class		Total	Water-source protection areas	Riparian zones	The rest of special measures areas
Total	Total	2,096.46	152.24	123.05	1,821.17
	Zone I	1,271.60	152.24	100.21	1,019.15
	Zone II	824.86	-	22.84	802.02
Namyangju-si	Total	194.92	42.38	8.09	144.45
	Zone I	111.32	42.38	8.09	60.85
	Zone II	83.60	-	-	83.60
Yongin-si	Total	207.34	-	24.21	183.13
	I zone	50.36	-	6.63	43.73
	Zone II	156.98	-	17.58	139.40
Icheon-si	Total	233.02	-	-	233.02
	Zone I	-	-	-	-
	Zone II	233.02	-	-	233.02
Gwangju-si	Total	430.96	83.63	9.61	337.72
	Zone I	428.04	83.63	9.61	334.80
	Zone II	2.92	-	-	2.92
Yeosu-si	Total	247.62	-	30.93	216.69
	Zone I	217.64	-	30.93	186.71
	Zone II	29.98	-	-	29.98
Gapyeong-gun	Total	190.89	-	17.23	173.66
	Zone I	91.29	-	11.98	79.31
	Zone II	99.60	-	5.26	94.34
Yangpyeong-gun	Total	591.71	26.24	32.97	532.50
	Zone I	372.95	26.24	32.97	313.74
	Zone II	218.76	-	-	218.76

Table 9. Population and density in the special measures areas of the Paldang watershed (2015)

Class	Population (person)			Population density (person/km ²)
	Total	Zone I	Zone II	
Namyangju-si	115,891	100,053	15,838	646
Yongin-si	182,929	26,638	156,291	882
Icheon-si	162,692	-	162,692	698
Gwangju-si	312,579	312,287	292	725
Yeoju-si	25,005	21,579	3,426	101
Gapyeong-gun	20,752	13,799	6,953	109
Yangpyeong-gun	98,784	75,238	23,546	167
Total	918,632	549,594	369,038	443

Table 10. Variation of population and sewage flow in the special measures areas of the Paldang watershed

Class	Year	Namyangju-si	Yongin-si	Icheon-si	Gwangju-si	Yeoju-si	Gapyeong-gun	Yangpyeong-gun	Total
Population (person)	2000	68,616	137,066	131,532	139,339	27,521	16,269	76,746	597,089
	2005	79,489	160,311	143,402	214,742	26,087	16,148	77,299	717,478
	2010	100,083	168,388	158,173	259,387	25,478	17,761	87,541	816,811
	2015	115,891	182,929	162,692	312,579	25,005	20,752	98,784	918,632
Sewage flow (m ³ /day)	2000	20,584	41,120	39,460	41,801	8,256	4,882	19,187	175,290
	2005	22,639	43,123	29,254	64,420	5,217	4,844	29,652	199,149
	2010	24,920	34,809	46,344	100,797	5,096	5,326	25,763	243,055
	2015	28,855	49,996	36,207	120,816	6,124	3,528	29,041	274,567

로 급격한 증가를 보이고 있다. 인구는 2000년 597,089명, 2005년 717,478명, 2010년 816,811명, 2015년 918,632명으로 2000년 대비 2015년에 1.5배 증가하였다. 오수 발생량도 2000년 175,290 m³/일, 2005년 199,149 m³/일, 2010년 243,055 m³/일, 2015년 274,567 m³/일로 2000년 대비 2015년에 1.6배 증가하였다. 인구와 생활오수 발생량이 가장 큰 지자체는 광주시로 인구는 2000년 139,339명에서 2015년 312,579명으로 2.2배 증가하였고, 생활오수 발생량도 2000년 41,801 m³/일에서 2015년 120,816 m³/일로 2.9배 증가하였다. 다음으로 남양주시는 인구가 2000년 68,616명에서 2015년 115,891명으로 1.6배 증가한 것으로 나타났다(Table 10).

3.2.3 가축 및 가축분뇨 발생량

가축두수(소·돼지)는 2000년 226,485두에서 2015년 374,668

두로 변화하여 2000년 대비 2015년에 1.7배 증가하였다. 2015년 기준으로 특별대책지역 총 가축두수 중 이천시 53.9%, 여주시는 17.3%, 용인시 17.0%, 그리고 기타 시·군(광주시, 남양주시, 양평군, 가평군)이 11.8%를 차지하였다. 가축분뇨 발생량은 2000년 3,812 m³/일에서 2015년 3,165 m³/일로 감소 경향을 보인다. 2015년 기준 총 가축분뇨발생량 중 이천시가 51.8%로 가장 많았고 다음으로 여주시 18.3%, 양평군 11.8%, 용인시 10.7% 그리고 기타 시·군(광주시, 남양주시, 가평군) 7.4%의 순이었다. 가장 많은 가축두수와 발생량을 보이는 이천시는 가축두수가 2000년 82,263두에서 2015년에 202,004두로 2.5배 증가하였고 가축분뇨 발생량도 2000년 982 m³/일에서 2015년 1,639 m³/일로 1.7배 증가하였다(Table 11).

Table 11. Variation of livestock population and manure in the special measures areas of the Paldang watershed

Class	Year	Namyangju-si	Yongin-si	Icheon-si	Gwangju-si	Yeoju-si	Gapyeong-gun	Yangpyeong-gun	Total
Population (number)	2000	21,225	29,703	82,263	22,341	43,534	3,433	23,986	226,485
	2005	8,457	8,282	135,374	7,709	66,606	3,074	30,970	260,472
	2010	10,310	65,970	219,307	11,746	64,571	2,548	36,585	411,037
	2015	6,537	63,730	202,004	6,972	64,750	960	29,715	374,668
Manure (m ³ /day)	2000	412	1,053	982	426	429	72	438	3,812
	2005	163	302	1,424	92	829	36	358	3,204
	2010	112	360	1,850	160	602	86	492	3,662
	2015	112	340	1,639	110	578	13	372	3,165

3.2.4 폐수배출시설 및 산업폐수 발생량

폐수배출시설은 2000년 1,287개소에서 2015년 1,059개소로 감소하였으나 폐수발생량은 2010년 71,133 m³/일에서 2015년 107,950 m³/일로 1.5배 증가하였다(Table 12). 2015년 기준으로 전체 폐수배출업소 1,059개소 중 500 m³/일 미만 배출업소가 1,044개소이고 500 m³/일 이상 배출업소는 15개소이나 폐수발생량은 500 m³/일 이상 시설에서 88,792 m³/일로 전체 82.3 %를 차지하였으며 500 m³/일 이상 시설과 500 m³/일 미만 시설 모두 발생량이 증가하는 경향을 보였다(Table 12).

2015년 기준으로 폐수발생량은 이천시가 260개 시설에서 92,155 m³/일로 가장 많았으며 다음으로 광주시 5,857 m³/일, 용인시 3,374 m³/일이고 평균이 가장 적은 625 m³/일이었다. 특히 500 m³/일 이상의 규모시설 전체 15개 시설 가운데 이천시 9개소가 있으며 폐수발생량도 전체 발생량

의 78.3 %를 차지하고 있다. 500 m³/일 미만 시설은 광주시와 이천시가 가장 많으며 광주시가 343 개소로 가장 많아 소규모 배출시설이 많이 나타났다(Table 13).

3.3 취수량의 변화

상수도통계를 이용하여 취수량 변화를 살펴보면 2000년 2,756백만톤, 2005년 2,858백만톤, 2010년 2,971백만톤, 2015년 3,136백만톤으로 점차 증가하였다(ME, 2001~2016). 2000년 대비 2015년의 인구와 산업시설은 1.5배 증가하였으나 취수량은 1.14배 정도 증가하는 것으로 나타났다. 2015년 상수도통계(2015년 12월 말 기준)를 이용하여 팔당호를 취수하고 있는 특별대책지역과 한강 하류에 위치하고 있는 22개 취수장과 41개 정수장의 용량 및 급수인구를 정리한 결과는 Table 14와 같다. 팔당호 상수원에서 급수한 인구는 총 2,418만명이고 일평균취수량은 8,594,708 톤/일

Table 12. Variation of number and flow of wastewater facility in special measures areas of the Paldang watershed

Class	Total		Above 500 m ³ /day		Under 500 m ³ /day	
	Facility (number)	Flow (m ³ /day)	Facility (number)	Flow (m ³ /day)	Facility (number)	Flow (m ³ /day)
2000	1,287	71,133	10	59,174	1,277	11,959
2005	941	94,157	10	82,045	931	12,112
2010	1,092	65,699	10	45,898	1,082	19,801
2015	1,059	107,951	15	88,792	1,044	19,159

Table 13. Wastewater facility and flow in the special measures areas of the Paldang watershed (2015)

Classification		Namyangju-si	Yongin-si	Icheon-si	Gwangju-si	Yeoju-si	Gapyeong-gun	Yangpyeong-gun
Total	Facility number)	61	220	260	346	56	25	91
	Flow (m ³ /day)	1,860	3,374	92,155	5,857	2,007	625	2,073
Above 500 m ³ /day	Facility number)	-	2	9	3	-	-	1
	Flow (m ³ /day)	-	1,901	84,544	1,758	-	-	590
Under 500 m ³ /day	Facility number)	61	218	251	343	56	25	90
	Flow (m ³ /day)	1,860	1,473	7,611	4,099	2,007	625	1,483

Table 14. Water intake and purification station (as of Dec. 2015)

Water intake facility				Water purification facility		Water supply population (people)	Water supply area
Station	Source	Max. water service volume	Ave. volume of intake	Station	Supply vol. (ton/day)		
		(ton/day)					
22		16,450,000	8,594,708	41	7,551,083	24,178,436	
Gapyeong tonghap	Bukhan river (groundwater)	20,000	16,119	Gapyeong tonghap	15,251	33,992	Gapyeong-eup, Cheongpyeong-myeon, Buk-myeon
Yeoju (Danhyeon)	Namhan river	52,500	33,952	Yeoju	33,347	97,593	Ganam-eup, etc. (1 eup·9 myeon·3 dong)
Icheon	Namhan river	66,000	35,001	Icheon	32,766	198,398	Bubal-eup(part), Sindun-myeon, Baeksa-myeon
Geumnam	Bukhan river	57,500	42,956	Hwado	39,708	169,691	Namyangsu-si Hwado-eup, Hopyeong-dong, Sudong-myeon, Joan-myeon, Pyeongnae-dong
Yangseo	Bukhan river	5,000	3,847	Yangseo	3,828	14,698	Yangpyeong-gun Yangseo-myeon, Seojong-myeon

Table 14. Water intake and purification station (as of Dec. 2015) (continued)

Water intake facility				Water purification facility		Water supply population (people)	Water supply area
Station	Source	Max. water service volume	Ave. volume of intake	Station	Supply vol. (ton/day)		
		(ton/day)					
Yangseo	Bukhan river	5,000	3,847	Yangseo	3,828	14,698	Yangpyeong-gun Yangseo-myeon, Seojong-myeon
Yangpyeong tonghap	Heuk stream	26,000	16,227	Yangpyeong tonghap	16,083	55,137	Yangpyeong-gu Yangpyeong-eup, Gangsang-myeon, Gangha-myeon, Okcheon-myeon, Jipyong-myeon, Yongmun-myeon, Gaegun-myeon, Yangseo-myeon(Guksu-ri)
Gwangju (stoped)	Lake Paldang	26,400	-	-	-	-	-
Gwangju-Yongin	Lake Paldang	330,000	166,064	Gwangju	97,394	288,115	Gwangju-si
				Yongin	63,251	204,529	Yongin-si Cheoin-gu (except Samga-dong, Osan-ri)
Paldang1	Paldang dam	2,600,000	1,088,803	Gwangam	220,130	757,817	Songpa-gu, etc. (1 gu-31 dong)
				Bisan	43,245	157,448	Anyang-si Manan-gu
				Poil	70,202	259,965	Anyang-si Dongan-gu
				Gwacheon	22,196	69,007	Gwacheon-si
				Banwol	120,094	335,460	Ansan-si
Paldang2	Han river/ Paldang dam	2,830,000	1,424,979	Wabu	89,625	83,369	Guri-si, Namyangju-si, Uijeongbu-si, Goyang-si
				Seongnam	444,110	1,540,135	Seongnam-si, Yongin-si, Suwon-si, Osan-si, Hwaseong-si, Pyeongteak-si, Anseong-si
				Siheung	50,056	129,257	Siheung-si
				Samdong	201,069	508,094	Incheon-si Nam-gu, Namdong-gu, Bupyeong-gu
				Ansan	57,447	189,441	Wa-dong, Gojan-dong, Sa-dong
				Noon	96,555	350,689	Gwangmyeong-si
				Cheonggye	18,484	58,466	Uiwang-si Naeson 1, 2-dong
				Gunpo	58,004	212,914	Gunpo-si
				Gochon	114,280	340,035	Gimpo-si
Paldang3	Paldang dam	2,380,000	1,583,396	Suji	649,993	1,884,295	Suwon-si, Yongin-si, Osan-si, Hwaseong-si, Pyeongteak-si, Anseong-si
				Susan	280,132	826,859	Incheon-si Jung-gu, Dong-gu, Nam-gu, Yeonsu-gu, Namdong-gu, Bupyeong-gu
				Kkachiul	174,322	640,767	Bucheon-si Wonmi-gu, Ojeong-gu
				Yeonseong	92,371	227,401	Ansan-si Seonbu-dong, Wongok-dong, Choji-dong
				Cheonggye	56,687	188,038	Anyang-si Manan-gu, Dongan-gu
Hanam	Han river	77,000	48,174	Hanam	46,548	158,759	Hanam-si(except Gambuk-dong)
Dogok	Han river	17,600	13,989	Dogok	12,783	55,764	Namyangju-si Wabu-eup
Deokso	Han river	475,000	337,112	Deokso	331,604	1,168,774	Namyangju-si, Uijeongbu-si, Goyang-si, Yangju-si, Pocheon-si, Dongducheon-si
Gangbuk	Han river	2,300,000	1,225,489	Gangbuk	803,957	2,721,250	Jongro-gu, etc. (8 gu)
				Guui	289,508	622,106	Gwangjin-gu, etc. (3 gu)
Jayang (Seoul)	Han river	1,450,000	176,256	Ddukdo	299,893	1,010,829	Jongro-gu, etc. (6 gu)

Table 14. Water intake and purification station (as of Dec. 2015) (continued)

Water intake facility				Water purification facility		Water supply population (people)	Water supply area
Station	Source	Max. water service volume (ton/day)	Ave. volume of intake (ton/day)	Station	Supply vol. (ton/day)		
Topyeong	Han river	63,000	29,623	Topyeong	26,730	71,427	Guri-si Topyeong-dong, Gyomun-dong, Sutaek-dong
Amsa	Han river	1,710,000	1,137,245	Amsa	1,118,220	3,442,008	Yongsan-gu, etc. (10 gu)
Hangang (Seongnam)	Han river	314,000	218,229	Bokjeong3	218,229	691,276	Seongnam-si
Pungnap (Incheon)	Down-stream of Han river	700,000	474,170	Bupyeong	225,591	790,737	Incheon-si Bupyeong-gu, Gyeyang-gu
				Gongchon	260,536	762,726	Incheon-si Jung-gu, Dong-gu, Seo-gu, Ganghwa-gun
Pungnap (Seoul)	Han river	700,000	448,170	Yaong-daepo	437,629	1,743,128	Eunpyeong-gu, etc. (6 gu)
Jayang (Ilsan)	Han river	250,000	74,875	Ilsan	125,267	517,580	Goyang-si(Ilsan, Deokyang), Paju-si(Gyoha)
				Goyang	193,958	600,462	Goyang-si, Paju-si

이며 이 가운데 팔당호에서 직접 취수하는 팔당 1, 2, 3 취수장과 광주용인, 광주취수장의 취수량은 전체 취수량의 50%를 차지하고 있다.

3.4 수질 및 조류

3.4.1 수질 변화

팔당호 수질은 북한강이 유입되는 삼봉리, 남한강은 강상, 경안천은 경안천 말단인 경안천5A, 팔당호 내 댐앞 등 총 4개 지점을 대상으로 살펴보았다(Table 15). 2000년부터 2015년 사이에 지점이 신설되거나 항목이 추가되기도 하였는데 경안천5A 지점은 2008년에 신설되었고 강상과 삼봉리 지점에서는 2001년, 경안천5A는 2010년 11월부터 Chl-a가 추가되었다. TOC는 2008년부터 전 지점에 추가되었다.

팔당호 대표지점인 댐앞 지점의 항목별 연평균 농도범위는 BOD 1.1~1.5 mg/L, COD 3.0~4.0 mg/L로 BOD는 점차 감소하는 추세를 보인 반면, COD는 소폭 증가하는 경향을 보였으나 비교적 안정적으로 유지되었다. SS는 3.1~15.0 mg/L이고 T-N은 1.775~2.350 mg/L였다. T-P는 0.029~0.058 mg/L이며 Chl-a는 14.7~23.3 mg/m³ 범위에서 감소하는 경향을 보였다. TOC는 2.0~2.5 mg/L 범위였다. 삼봉리 지점에서는 BOD 0.8~1.3 mg/L, COD 2.4~3.5 mg/L였으며 댐앞과 유사하게 BOD는 점차 감소하는 반면 COD는 점차 증가하는 경향을 보였다. SS는 2.1~8.9 mg/L의 범위이고 T-N은 1.470~1.905 mg/L, T-P는 0.018~0.042 mg/L였다. Chl-a의 경우 8.1~15.1 mg/m³이고 TOC는 1.8~2.1 mg/L의 범위였다. 강상 지점에서 BOD 1.1~1.8 mg/L, COD 2.9~4.3 mg/L이고 SS는 4.0~11.4 mg/L, T-N은 2.126~2.932 mg/L, T-P는 0.041~0.092 mg/L였다. Chl-a의 범위는 11.7~25.1 mg/m³로 감소하는 추세를 보였으며 TOC는 2.1~2.7 mg/L 범위였다. 경안천5A에서는 BOD 2.2~3.2 mg/L, COD 5.2~6.7 mg/L, SS 9.3~15.5 mg/L이고 TOC는 2.9~4.5 mg/L, T-N은 4.393~5.492 mg/L, T-P는 0.048

~0.223 mg/L, Chl-a는 11.2~23.3 mg/m³이었다. 특히 경안천은 T-P는 2012년부터 점차 낮아져 0.1 mg/L이하로 나타나 수질이 개선되고 있음을 알 수 있다. 경안천5A를 제외하고 팔당댐을 비롯한 3개 지점의 연평균 BOD농도는 생활환경기준 “좋음(Ib)” 수준인 2 mg/L 이내를 유지하고 안정적인 수질을 보이고 있다.

3.4.2 유입부하량 변화

팔당호로 유입되는 남한강과 북한강, 경안천의 BOD, TN, TP 유입부하량은 팔당호에 인접한 지점의 유량과 수질 자료를 이용하여야 하나 이를 만족하는 경우가 없어 가능한 인근 수질 자료와 유량자료를 이용하였다. 남한강은 유량은 2014년 이전까지 여주대교, 2014년 이후에는 이포보이고 수질은 강상지점의 자료를 이용하였다. 북한강은 청평댐 방류량과 삼봉리 지점의 수질자료를 이용하였으며, 경안천은 경안교의 유량과 경안천5 지점의 수질자료를 이용하여 유입부하량을 산정하였다. 이포보 건설 이전 여주대교 지점의 유량은 양화천과 복화천, 흑천 등 유입 지천이 포함되지 않았으나 두지점의 유량을 비교할 수 있는 2014년과 2015년으로 볼 때 이들 지천 유량이 전체 유량의 0.8~5.4% 정도로 판단된다. 따라서 남한강은 여주북한강은 청평댐 하류 목현천과 벽계천 등에 의한 유량을 포함하지 못하였기에 대략적인 평균 부하량으로 비교한 것이다. BOD 유입부하량은 2000년 56,565 kg/day에서 2005년 47,539 kg/day, 2010년 44,993 kg/day이고, 2015년은 20,837 kg/day였으며, TN 유입부하량은 2000년 78,576 kg/day, 2005년 126,949 kg/day, 2010년 93,367 kg/day, 2015년은 29,796 kg/day였다. TP 유입부하량은 2000년 1,756 kg/day, 2005년 2,700 kg/day, 2010년 1,969 kg/day, 2015년은 356 kg/day였다(Table 16).

부하량은 유량의 영향을 받으므로 유량의 변화에 따른 부하량의 변화를 살펴보면 2015년은 가뭄의 영향으로 유량이 160.3 m³/s로 2000년 411.9 m³/s에 비하여 61% 감소하

Table 15. Annual averaged water quality in the Lake Paldang

Site	Year	Temp. (°C)	pH	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	SS (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	Chl-a (mg/m ³)	TOC (mg/L)
Paldangdam-ap	2000	15.2	8.7	1.5	3.0	4.0	1.957	0.029	15.1	-
	2001	15.1	9.0	1.4	3.1	3.1	2.168	0.045	23.3	-
	2002	14.4	8.6	1.4	3.3	4.3	2.258	0.050	21.7	-
	2003	13.7	8.5	1.3	3.1	5.9	2.247	0.058	19.3	-
	2004	13.0	8.1	1.3	3.7	15.0	2.069	0.054	20.3	-
	2005	12.9	8.0	1.1	3.5	9.5	2.206	0.047	17.9	-
	2006	12.8	7.8	1.2	3.3	11.1	2.190	0.055	18.1	-
	2007	13.1	8.0	1.2	3.6	9.4	2.350	0.051	16.2	-
	2008	13.5	8.1	1.3	3.8	6.4	1.938	0.042	16.2	2.0
	2009	13.2	8.2	1.3	4.0	6.9	1.775	0.034	17.6	2.5
	2010	12.7	7.9	1.2	3.9	6.2	2.076	0.034	14.7	2.1
	2011	12.5	8.0	1.1	3.8	14.3	2.292	0.045	13.8	2.2
	2012	12.6	8.0	1.1	3.9	7.6	2.267	0.039	12.5	2.2
	2013	12.8	7.8	1.1	3.7	7.0	2.200	0.037	12.9	2.0
	2014	14.0	8.1	1.2	3.5	4.0	2.004	0.023	10.3	2.2
2015	14.4	7.6	1.3	3.5	3.8	1.988	0.022	10.5	2.4	
Sambongri	2000	13.1	8.1	1.1	2.6	3.3	1.470	0.018	-	-
	2001	14.0	8.5	1.3	2.7	2.1	1.734	0.029	8.1	-
	2002	13.0	8.0	1.1	2.5	3.4	1.786	0.032	9.8	-
	2003	12.9	7.6	1.1	2.4	3.5	1.805	0.037	9.0	-
	2004	13.2	7.6	1.1	3.3	5.4	1.553	0.023	12.6	-
	2005	13.8	7.6	1.0	3.3	4.9	1.905	0.022	15.1	-
	2006	13.0	7.5	1.0	2.9	8.9	1.876	0.042	12.8	-
	2007	12.9	8.2	0.8	3.0	8.7	1.904	0.036	9.0	-
	2008	13.3	8.1	1.1	3.5	5.1	1.636	0.032	13.4	1.8
	2009	13.2	8.2	1.1	3.4	5.2	1.548	0.024	11.3	2.1
	2010	12.6	8.1	0.9	3.5	4.3	1.712	0.021	10.3	1.9
	2011	12.3	7.8	0.9	3.2	4.8	1.889	0.025	9.6	1.8
	2012	12.6	8.0	1.1	3.8	4.9	1.977	0.024	12.4	2.1
	2013	12.5	7.8	0.7	3.2	4.4	1.844	0.019	7.4	1.7
	2014	14.4	8.0	0.9	3.1	2.4	1.746	0.012	6.0	1.8
2015	17.5	7.7	1.0	3.2	2.8	1.812	0.013	8.8	2.1	
Gangsang	2000	13.1	8.5	1.8	3.0	5.7	2.558	0.041	-	-
	2001	14.4	8.8	1.6	3.6	4.0	2.562	0.050	24.3	-
	2002	13.8	8.2	1.5	3.5	8.1	2.932	0.074	25.1	-
	2003	13.5	8.1	1.4	2.9	5.8	2.725	0.092	15.8	-
	2004	12.9	8.3	1.7	3.8	9.1	2.539	0.051	16.9	-
	2005	14.6	7.8	1.1	3.4	8.9	2.790	0.055	12.6	-
	2006	13.8	8.3	1.8	3.6	8.1	2.315	0.061	24.9	-
	2007	14.0	8.1	1.7	4.0	11.4	2.631	0.066	18.1	-
	2008	14.3	8.2	1.6	4.0	7.5	2.388	0.063	15.2	2.3
	2009	14.7	8.4	1.8	4.3	7.6	2.126	0.045	22.9	2.7
	2010	13.8	8.0	1.3	4.1	10.1	2.559	0.049	11.7	2.3
	2011	13.0	8.0	1.2	4.1	29.7	2.742	0.067	10.3	2.3
	2012	13.6	8.2	1.5	4.3	10.5	2.683	0.051	11.9	2.4
	2013	13.6	7.9	1.1	3.9	12.5	2.547	0.053	6.7	2.1
	2014	15.4	8.3	1.7	3.9	5.4	2.364	0.038	15.2	2.5
2015	18.7	8.0	2.3	4.2	5.3	2.161	0.039	17.4	2.9	
Gyeongan-cheon5A	2008	14.4	7.9	2.7	6.2	12.0	5.260	0.223	-	3.6
	2009	14.4	8.2	3.2	6.7	13.5	5.240	0.213	-	4.5
	2010	13.7	7.9	2.2	5.9	9.3	5.080	0.127	-	3.5
	2011	13.0	8.0	2.4	6.0	15.5	5.492	0.125	11.2	3.7
	2012	13.3	8.1	2.6	6.2	9.6	5.341	0.067	26.9	3.8
	2013	13.4	8.1	2.0	5.2	10.5	4.393	0.062	20.1	2.9
	2014	14.7	8.2	3.2	6.3	12.0	4.689	0.065	31.8	4.1
2015	15.3	8.3	2.4	5.3	10.8	4.609	0.048	27.0	3.8	

Table 16. The change of annual flow rate, water quality, and inflow load in the Lake Paldang

Year	Discharge (m ³ /s)	Concentration (mg/L)			Inflow loading (kg/day)		
		BOD	TN	TP	BOD	TN	TP
2000	411.9	9.5	13.210	0.606	56,565	78,576	1,756
2001	321.4	9.2	13.540	0.610	62,645	89,502	3,221
2002	462.9	11.4	16.041	0.540	76,145	115,258	3,181
2003	913.1	7.0	14.031	0.503	111,296	218,681	7,898
2004	623.2	7.8	11.938	0.486	88,357	128,591	3,721
2005	512.1	5.6	12.754	0.389	47,539	126,949	2,700
2006	687.3	8.0	10.765	0.403	85,014	134,629	4,113
2007	609.5	6.9	10.449	0.283	62,846	123,390	3,942
2008	638.5	6.1	9.199	0.257	77,789	120,550	3,210
2009	442.4	7.0	9.177	0.259	54,077	70,744	1,772
2010	486.4	5.3	9.255	0.236	44,993	93,367	1,969
2011	819.4	4.1	9.882	0.216	63,883	172,022	5,145
2012	461.9	5.1	9.373	0.122	51,864	99,273	2,093
2013	553.4	4.1	8.619	0.123	48,669	101,731	2,700
2014	233.3	5.5	8.865	0.116	26,711	42,984	600
2015	160.3	5.4	8.860	0.106	20,837	29,796	356
Average	521.1	6.7	10.997	0.328	61,202	109,127	3,024

였으나 유입부하량은 2000년에 비하여 2015년에 BOD는 70 %, TN은 71 %, TP는 89 % 감소하는 것으로 나타났고 특히 TP의 감소폭이 크게 나타났다. 유입 하천별 유입부하량은 Table 17에서와 같이 경안천의 유입부하량이 2006년부터 감소하였는데 유량에 비하여 수질 농도의 감소 영향

이 큰 것으로 수질관리 개선효과를 보여주는 것으로 판단된다. 2006년부터 부하량 기여율은 BOD의 경우 남한강이 57~71 %, 북한강은 23~38 %, 경안천이 3~7 % 범위였다. TN 부하량은 남한강 52~72 %, 북한강 24~41 %, 경안천 3~7%의 범위이고, TP 부하량은 남한강 61~80 %,

Table 17. Comparison of annual discharge and inflow load by river

Year	Discharge (m ³ /s)			BOD (kg/day)			T-N (kg/day)			T-P (kg/day)		
	Namhan	Bukhan	Gyeongang	Namhan	Bukhan	Gyeongang	Namhan	Bukhan	Gyeongang	Namhan	Bukhan	Gyeongang
2000	177.3	209.3	25.3	25,189	19,610	11,765	39,106	26,922	12,547	727	356	673
2001	105.5	160.2	55.8	14,755	19,368	28,521	23,259	25,446	40,796	448	485	2,288
2002	245.0	188.0	30.0	30,766	17,371	28,008	56,603	28,288	30,367	1,575	534	1,072
2003	582.1	289.5	41.5	67,594	27,793	15,910	141,627	47,469	29,584	5,468	1,173	1,256
2004	365.8	224.9	32.5	53,950	21,438	12,969	77,570	30,193	20,829	2,054	594	1,073
2005	286.5	194.0	31.6	24,572	15,554	7,412	71,211	36,785	18,952	1,645	382	674
2006	426.4	243.0	17.8	55,633	21,745	7,636	86,131	40,881	7,617	2,846	832	436
2007	374.5	222.2	12.9	43,577	16,385	2,883	82,243	36,203	4,943	2,904	875	163
2008	422.3	201.2	14.9	55,292	18,146	4,351	86,859	28,925	4,766	2,297	737	176
2009	211.0	218.2	13.2	30,944	19,440	3,693	36,976	28,690	5,078	1,073	531	168
2010	258.0	218.0	10.4	26,495	16,100	2,399	56,470	33,376	3,521	1,352	470	147
2011	479.2	325.2	14.9	43,356	18,393	2,133	109,896	57,180	4,946	4,006	967	172
2012	281.5	169.8	10.6	32,722	17,328	1,815	66,283	30,002	2,988	1,655	386	52
2013	272.3	271.5	9.6	28,430	18,613	1,626	58,751	40,171	2,810	1,980	674	46
2014	136.9 (135.8)	93.1	3.3	18,784 (18,833)	7,176	702	27,715 (27,987)	13,810	1,187	475 (481)	101	19
2015	85.2 (80.6)	71.4	3.8	13,931 (13,483)	6,133	773	17,199 (16,192)	11,171	1,426	254 (244)	82	20
Avg.	294.0	206.2	20.5	35,346	17,537	8,287	64,806	32,220	12,022	1,922	574	527

* () : outflow and load of Yeosu bridge

북한강 17~30%, 경안천 2~7%을 보였다. 전체적으로 북한강에 비하여 남한강의 유입부하량이 높게 나타나고 있다 (Table 17).

3.4.3 조류 변화

조류 발생은 조류경보제로 운영되는 지점을 대상으로 살펴 보았다. 대상 지점은 2011년까지 팔당댐앞과 남한강 월계사앞(2016년부터 “부용사앞”으로 변경) 두 개 지점이었으나 2011년에 북한강 삼봉리 부근에서 조류가 대발생하면서 2012년부터 삼봉리 지점이 추가되어 3개 지점이다. 2015년까지 조류경보제는 Chl-a 농도와 유해남조류(*Anabaena*, *Microcystis*, *Aphanizomenon*, *Oscillatoria* 4속) 개체수에 따라 발령단계가 “조류주의보”, “조류경보”, “조류대발생”으로 구분되었다. 팔당호에서 발령된 단계는 모두 “주의보” 수준이었다. 식물플랑크톤 분류군별 세포수와 총세포수 등 군집 변화를 요약한 결과는 Table 18과 같다. 2002년에서 2004년, 2007년과 2008년에 유해남조류와 총남조류 세포수를 명확히 구분할 수 없어 정리된 자료를 근거로 팔당댐앞 지점의 식물플랑크톤 총세포수를 보면 2007년에 174,073 cells/mL로 가장 적었고 2010년에 466,050 cells/mL로 가장 많게 나타났다. 2010년과 2015년은 “주의보”가 각각 42일, 43일간 발령되었다(ME, 2016a). 총세포수 중 유해남조류가 차지하는 비율이 가장 높은 해는 2008년이며 25%를 차지하였고, 2014년과 2015년은 각각 11.6%와 18.5%를 차지하였다. 월계사앞 지점의 식물플랑크톤 총세포수는 2002년에 234,663 cells/mL로 가장 적었으며, 2015년에 567,056

cells/mL로 가장 많았고 총세포수 중에 유해남조류가 차지하는 비율이 가장 높은 해는 2008년으로 9.7%이고 다음이 2015년 2.4%로 유해남조류의 출현 비율은 다른 지점에 비하여 높지 않다. 삼봉리 지점은 4년간의 결과로만 볼 때 식물플랑크톤 총세포수는 102,757~208,796 cells/mL로 상기 두 개의 지점과 비교할 때 많지 않지만 총남조류 중 유해남조류가 차지하는 비율이 2015년 8.5%로 가장 높게 나타났다. 식물플랑크톤의 발생량이 많고 유해남조류가 많이 출현하는 2008년, 2010년, 2014년과 2015년은 기상 및 수문에서 살펴본 바와 같이 대체적으로 여름철 강수 영향으로 일평균 25°C 연속일수와 무강수 일수가 길었던 해였으며 이로 인하여 체류시간 증가 및 기온이 높아진 요인 때문으로 해석된다.

4. Conclusion

팔당호 유역환경과 물환경 변화를 종합적으로 조사 평가하고자 다양한 정보시스템에서 제공하는 통계자료를 중심으로 2000년부터 2015년까지 기상·수문, 오염원, 수질 및 조류 발생으로 구분하여 종합한 결과는 다음과 같다.

연평균 기온은 11.3~12.9°C의 범위이며 최근 2014년과 2015년에 각각 12.5°C, 12.9°C로 높게 나타났다. 일평균 25°C 이상 지속일수가 가장 많은 해는 2012년으로 29일간 지속되었으며 무강수 연속일수도 가장 길었다. 무강수 연속일수는 2014년(26일), 2008년(25일)에도 25일 이상이었다. 2012년, 2014년과 2015년은 25°C 지속일수와 무강수 연속

Table 18. Variation of phytoplankton taxa with harmful cyanobacteria in 2002~2015 (unit : cells/mL)

Site	Classification	Year													
		2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Paldang-dam-ap	Diatom	95,742	179,613	230,645	188,896	150,391	92,750	97,366	201,939	311,761	273,115	190,830	171,570	107,490	138,885
	Green algae	31,559	13,530	37,812	50,895	34,567	32,496	42,711	32,326	45,470	19,907	19,820	19,230	12,240	25,069
	Cyanobacteria	27,724	13,193	94,357	41,292	37,888	- ¹⁾	- ¹⁾	23,472	67,378	17,175	12,702	8,255	36,569	72,215
	(Harmful cyano.)	- ²⁾	- ²⁾	- ²⁾	25,289	26,823	9,151	54,365	11,688	21,103	11,425	10,424	2,644	22,439	50,032
	Others	34,632	56,420	88,834	60,259	34,245	39,676	23,273	17,863	41,706	36,713	41,270	31,980	36,980	33,960
	Total	189,657	262,756	451,648	341,342	257,091	174,073	217,715	275,600	466,315	346,910	264,622	231,035	193,279	270,129
Wolgyesa-ap	Diatom	139,732	215,768	257,146	210,290	205,122	177,562	195,651	262,018	216,546	266,722	224,910	202,660	256,790	253,935
	Green algae	48,546	14,820	55,291	60,743	63,640	37,912	115,876	79,889	36,724	20,628	14,250	18,660	41,900	46,458
	Cyanobacteria	17,930	12,465	109,860	26,845	53,683	- ¹⁾	- ¹⁾	34,305	66,418	20,715	7,905	7,916	35,531	210,808
	(Harmful cyano.)	- ²⁾	- ²⁾	- ²⁾	3,254	5,002	3,401	39,078	3,235	4,010	2,480	175	3,719	328	13,685
	Others	28,455	53,000	87,368	72,253	39,498	50,171	50,514	40,676	43,593	45,883	42,450	38,680	66,240	55,855
	Total	234,663	296,053	509,665	370,131	361,943	269,046	401,119	416,888	363,281	353,948	289,515	267,916	400,461	567,056
Sam-bongri	Diatom	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	156,731	80,500	74,410	81,534
	Green algae	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8,390	4,130	5,530	23,255
	Cyanobacteria	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16,605	3,787	8,798	24,153
	(Harmful cyano.)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15,285	1,777	8,358	13,298
	Others	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27,070	14,340	24,420	28,137
	Total	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	208,796	102,757	113,158	157,079

1) Unconfirmed number of total cyanobacteria cells
 2) Unconfirmed number of harmful cyanobacteria cells

일수가 모두 길었다. 연간 강수량은 2014년과 2015년에 각각 790.1 mm와 801.5 mm로 가장 적었으며 연평균 체류시간이 2015년 15.5일로 가장 길었다.

팔당호 유역의 오염원은 인구의 경우 2000년에 비하여 2015년에 1.5배 증가하고 오수발생량도 1.6배 증가하였다. 가축분뇨 발생량은 2000년 3,811 m³/일에서 2015년 3,165 m³/일로 감소 경향을 보였으며, 폐수발생량은 2000년 71,133 m³/일에서 2015년 107,950 m³/일로 1.5배 증가하였다. 반면에 취수량은 1.14배 정도 증가하는 정도였다.

팔당호 수질변화는 대표지점인 땀앞 지점에서 BOD는 1.1~1.5 mg/L의 범위로 점차 감소하는 추세를 보이는 가운데 SS는 3.1~15.0 mg/L, T-N 1.775~2.350 mg/L, T-P 0.029~0.058 mg/L, Chl-a 14.7~23.3 mg/m³ 범위였다. 팔당호 연평균 BOD농도는 생활환경기준 “좋음(Ib)” 수준인 2 mg/L 이내를 유지하고 비교적 안정적인 수질을 보이고 있다. 유입하천 부하량의 변화가 큰 경안천은 유량 변화에 비하여 수질농도 감소로 유입부하량 기여율이 2006년부터 11%로 낮아지면서 2015년에는 BOD, T-N, T-P 모두 5% 이내로 감소하였다. 부하량 기여율은 BOD가 남한강 57~71%, 북한강 23~38%, 경안천 3~9% 범위였다. TP는 남한강 61~80%, 북한강 17~30%, 경안천 2~11%였다. 조류 발생은 팔당땀앞 지점에서 총세포수로 174,073~451,648 cells/mL의 범위였으며 유해남조류 발생은 2008년에 총세포수 중 25%로 가장 많았고 2014년과 2015년에도 각각 11.6%와 18.5%로 높게 나타났다. 식물플랑크톤 발생량이 많고 유해남조류가 많이 출현하는 경우는 25°C 이상 연속 일수와 무강수 연속일수 등과 같은 기후적 요인에 영향을 받는 것으로 나타났다. 따라서 기후변화로 인한 극심한 가뭄과 기온 상승은 조류 대발생 뿐만 아니라 유해남조류 발생 가능성을 증가시키므로 지속적인 오염원 관리로 발생 가능성과 조류발생 취약지점에서의 확산을 최소화하는 노력이 필요하다.

본 연구는 향후 팔당호 물환경보전 정책의 효과분석에 기초자료로 활용될 수 있으며 본문에서 획득된 다양한 자료를 토대로 기술통계 분석을 적용한 수질변화 요인 분석

및 관리방안 연구를 좀 더 심도있게 추진할 필요가 있다.

Acknowledgement

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2017-01-01-079).

References

- Han-River Environmental Research Center (HERC). (2015). *A Comprehensive study on water quality control of Paldang watershed*, Han-River Environmental Research Center. [Korean Literature]
- Han-River Environment Research Center (HERC). (2016). *White paper of algae in Lake Paldang*, Han-River Environment Research Center. [Korean Literature]
- Korea Meteorological Administration (KMA). (2018). *Meteorological data open portal*, <http://data.kma.go.kr> (accessed June 2018).
- Ministry of Environment (ME). (2016a). *Annual report on algae occurrence and response in 2016*, Ministry of Environment. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (ME). (2016b). *Special measures areas for the preservation of the quality of water sources in Lake Paldang*, Ministry of Environment.
- Ministry of Environment (ME). (2018). *Water information system*, <http://water.nier.go.kr> (accessed June 2018).
- Ministry of Environment (ME). (2001~2016). *Statistics of waterworks*, Ministry of Environment.
- National Institute of Environmental Research (NIER). (1989). *Modeling water quality of Pal-Dang reservoir*, National Institute of Environmental Research. [Korean Literature]
- National Institute of Meteorological Sciences (NIMS). (2018). *Climate change for 100 years in the Korean Peninsula*, National Institute of Meteorological Sciences. [Korean Literature]