

수질평가지수를 이용한 시화호 내측 및 외측 해역의 시·공간적 수질 변화 평가: 조력발전소 가동에 따른 영향 연구

나공태¹ · 김종근¹ · 김은수² · 김경태^{1,†} · 이정무² · 김성근¹ · 김의열¹ · 이승용¹ · 박은주²

¹한국해양과학기술원 해양환경 · 보전연구부

²한국해양과학기술원 기기검교정 · 분석센터

Evaluation of Spatial and Temporal Variations of Water Quality in Lake Shihwa and Outer Sea by Using Water Quality Index in Korea: A Case Study of Influence of Tidal Power Plant Operation

Kongtae Ra¹, Jong-Keun Kim¹, Eun-Soo Kim², Kyung-Tae Kim^{1,†}, Jung-Moo Lee², Sung-Keun Kim¹,
Eu-Yeol Kim¹, Seung-Yong Lee¹ and Eun-Ju Park²

¹Marine Environments and Conservation Research Division, Korea Institute of Ocean
Science and Technology (KIOST), Ansan 426-744, Korea

²Oceanographic Measurement and Instrument Calibration Service Center, Korea Institute of
Ocean Science and Technology(KIOST), Ansan 426-744, Korea

요 약

인공호수인 시화호 유역은 우리나라에서 가장 고도로 산업화가 진행되고 있는 지역 중 하나이며 현재 조력발전소 가동으로 인한 수질변화가 예상되고 있다. 본 연구에서는 2011~2012년 동안 총 14회에 걸쳐 시화호 내·외측의 투명도, 저층 용존산소 포화도, 용존무기인, 용존무기질소 및 클로로필-a의 조사결과를 개정된 수질평가기준(수질평가지수, WQI)에 적용하여 시화호 주변해역의 시·공간적 수질변화 특성과 조력발전소 가동에 따른 수질개선 효과를 평가하였다. 수질평가지수는 시화호 내측의 산업단지 주변과 외측의 하수처리장 방류구 주변에서 상대적으로 높았으며 각각 시화호 방조제와 외해역으로 갈수록 감소하는 수평분포 특성을 나타내었다. 시화호 내·외측의 수질은 주로 시화호 유역의 산업지역, 도심지역 및 농촌지역에 산재하는 비점오염유출과 하수처리장 방류에 큰 영향을 받고 있는 것을 알 수 있었다. 시화호 내측 수질평가지수는 2011년 평균 53.0(IV 등급, 나쁨)에서 2012년 평균 42.8(III 등급, 보통)로 큰 폭으로 감소하였다. 조력발전소 가동이 해수교환량을 증가시켜 저층 빈산소 환경이 약화되어 시화호 수질이 크게 개선된 것으로 나타났다. 시화호 외측 수질평가지수는 2011년과 2012년 각각 37.4와 35.3으로 모두 보통(III 등급)의 수질상태를 보여 조력발전소 가동 이후 내측 해수의 외측 방류에 의한 수질 오염은 없는 것으로 판단된다. 그러나 군집분석 결과, 산업단지 주변의 시화호 상류지역은 조력발전소 가동을 통한 수질개선 효과가 미미한 것으로 나타났으며, 강우가 집중되는 여름철에 수질이 악화되고 있어 시화호 전체 수질을 개선시키기 위해서는 하천이나 우수토구를 통한 비점오염물질 관리 및 저감대책이 시급한 것으로 판단된다.

Abstract – The basin of Lake Shihwa is one of highly industrialized region of Korea and a current environmental issue of study area is the operation of tidal power plant (TPP) to improve water quality. The application of water quality index (WQI) which integrates five physiochemical parameters (transparency, DO, DIN, DIP and chlorophyll-a) of water quality in Lake Shihwa and outer sea during 2011~2012 were performed not only to evaluate the spatial and temporal distribution of the water quality but also to assess the effect of water quality improvement by the operation of tidal power plant. The higher WQI values were observed in monitored sites near the industrial complexes in Lake Shihwa and the outfall of wastewater treatment plants (WWTPs) in outer sea. This indicates that the quality of seawater is influenced by diffuse non-point sources from industrial, munic-

[†]Corresponding author: ktkim@kiost.ac

ipal and agricultural areas in Lake Shihwa and by point sources from the effluence of municipal and industrial wastewater throughout WWTPs in outer sea. Mean WQI value decreased from 53.0 in 2011 to 42.8 in 2012 of Lake Shihwa. Water quality has improved significantly after TPP operation because enhancement of seawater exchange between Lake Shihwa and outer sea leads to improve a hypoxic condition which is primarily a problem in Lake Shihwa. Mean WQI of outer sea showed similar values between 2011 and 2012. However, the results of hierarchical cluster analysis and the deterioration of water quality in summer season indicate that the operation of tidal power plant was not improved the water quality in the upper most area of Lake Shihwa. To successfully improve overall water quality of Lake Shihwa, it is urgently necessary to manage and reduce of non-point pollution sources of the basin of Lake Shihwa.

Keywords: Lake Shihwa(시화호), Water quality index(수질평가지수), Tidal power plant(조력발전소), Non-point source pollutants(비점오염물질), Wastewater treatment plants(하수처리장), Hypoxic(빈산소)

1. 서 론

우리나라는 급속한 산업화 및 도시화로 인하여 인간활동에 의해 발생된 오염물질의 해양부하량이 날로 증가하고 있다. 특히 우리나라 연안환경은 몬순기후의 영향으로 하계에 집중적인 강우로 다량의 오염물질(유기물, 영양염류 등)이 강이나 하천을 통하여 별도의 처리과정 없이 해역으로 유출되어 수질변화 및 생태계 변동 등을 초래하고 있다. 연안해역의 수질은 유역으로부터 직접 유입되거나 하천이나 강을 통해 유입되는 오염부하에 의해 크게 영향을 받으며 이는 해양 생태계의 건강 및 안정성과 밀접하게 연관되어 있다.

지속적이고 건강한 국내 해양환경을 유지 및 효율적인 관리를 위하여 정부에서는 이화학적 분석항목(수소이온농도, 화학적산소요구량, 용존산소, 총질소 및 총인)에 대해 I, II, III 등급으로 구분하는 해역별 수질등급기준을 설정하여 수질평가를 수행하여 왔다(해양수산부 고시 제98-37호). 미국 역시 우리나라와 유사하게 각 수질인자의 농도를 3가지 단계로 구분하여 평가하나 해역특성에 맞게 기준농도를 달리 설정함으로써 효율적으로 해역 수질을 관리하고 있다(EPA[2007]). 그러나 우리나라는 각 항목의 기준이 모호하며 해역 및 환경특성에 큰 차이를 보이나, 기존의 수질평가 기준은 국내 모든 해역을 동일한 기준을 이용하여 평가하도록 되어있어 해역별 특성을 반영하지 못해 해양의 오염현황을 명확하게 평가하기가 어려웠다. Lim *et al.*[2011]은 2001~2006년간 국가해양측정망 자료(클로로필-a, 용존무기질소, 용존무기인 및 화학적산소요구량)를 통계학적으로 접근하여 서해, 남해 및 동해 연안의 해역별 수질성분의 범위 및 분포특성을 파악하였으며 상대적인 등급화를 시도하였다. 연안 해역별 환경특성을 올바르게 반영하기 위하여 각 수질항목의 농도를 낮음, 보통, 높음 및 매우 높음의 4 등급으로 제시한 바 있다. Kim *et al.*[2012]은 기존의 수질평가항목에 부영양화와 관련 있는 용존무기질소, 용존무기인 및 클로로필-a를 포함하여 동해 연안의 부영양화 및 유기물 오염도를 평가한 바 있다. 이러한 연구들은 방대한 자료가 필요하거나 외국의 평가방법에 의존하기 때문에 국내 해역 수질평가에 적용하기에는 어려움이 있으며 기존의 단편적 지표에 의존하는 수질관리가 아닌 국내 해양환경을 고려하며 종합적인 접근에 기반한 수질평가 및 관리의 필요성이 제기되었다.

2011년 해양환경관리법에 따른 해양환경기준을 통해 국내 수질 악화 및 오염도를 평가하기 위하여 새로운 생태기반 해수수질기준이 설정되었다(국토해양부 고시 제2011-972호). 새로운 수질평가항목은 저층 용존산소 포화도, 식물플랑크톤 농도(클로로필-a), 투명도, 용존무기질소 및 용존무기인의 5 가지로 구성된다. 또한 우리나라를 5개 해역(동해, 대한해협, 서남해역, 서해중부 및 제주)으로 구분하여 각 항목에 대한 기준을 제시함으로써 해역에 따른 특성을 반영할 수 있게 되었다. 수질평가항목을 개별로 평가하는 것이 아니라 각각의 평가항목을 지역에 따른 기준과의 비교를 통하여 기준과의 농도차이를 5 단계의 항목별 점수로 나타낸 뒤 종합적인 수질평가 지수로 계산하여 총 5개의 등급으로 해수수질을 평가하고 있다.

시화호는 1994년 시화방조제 건설에 의하여 생성된 인공호수이며 해수교환이 중단됨에 따라 시화호 유역에서 미처리된 오·폐수 등의 오염물질이 유입되어 부영양화가 급속히 진행되었고 수질이 악화되었다(KORDI[1999]). 2000년 담수화를 포기하였으며 시화호 유역을 시화호-인천연안 특별관리해역으로 지정하고 2001년 이후 시화호 수질개선을 위해 노력하였으나, 육상기인 오염부하 증가 및 해수교환의 제한으로 인하여 수질이 크게 개선되지 않았다. 특히 여름철 영양염류의 과도한 유입으로 인하여 부영양화 및 유기물 분해에 산소를 급속히 소모함으로써 매년 봄철에서 가을철까지 저층의 무산소 및 빈산소 환경의 문제점이 끊임없이 나타났다(MTLM [2009]; [2010]; [2011]; Park *et al.*[2003]). 청정에너지 생산 및 수질악화의 문제점을 해결하기 위하여 시화호 조력발전소가 건설되어 현재 운영되고 있고 있으며, 시화호 주변해역의 수질변화가 예상되고 있다. 따라서 본 연구에서는 개정된 수질평가지수를 적용하여 지난 2년간(2011~2012년) 시화호 내·외측에서 수질의 시·공간적 변화 특성과 수질평가를 실시하였으며 조력발전소 운영에 따른 수질개선 효과에 대한 고찰을 실시하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 시료채취 및 분석방법

시화호 내측 14개 정점과 외측 21개 정점에서 2011년 7회(4월, 6월, 7월, 8월, 9월, 10월 및 12월)와 2012년 7회(5월, 6월, 7월, 8

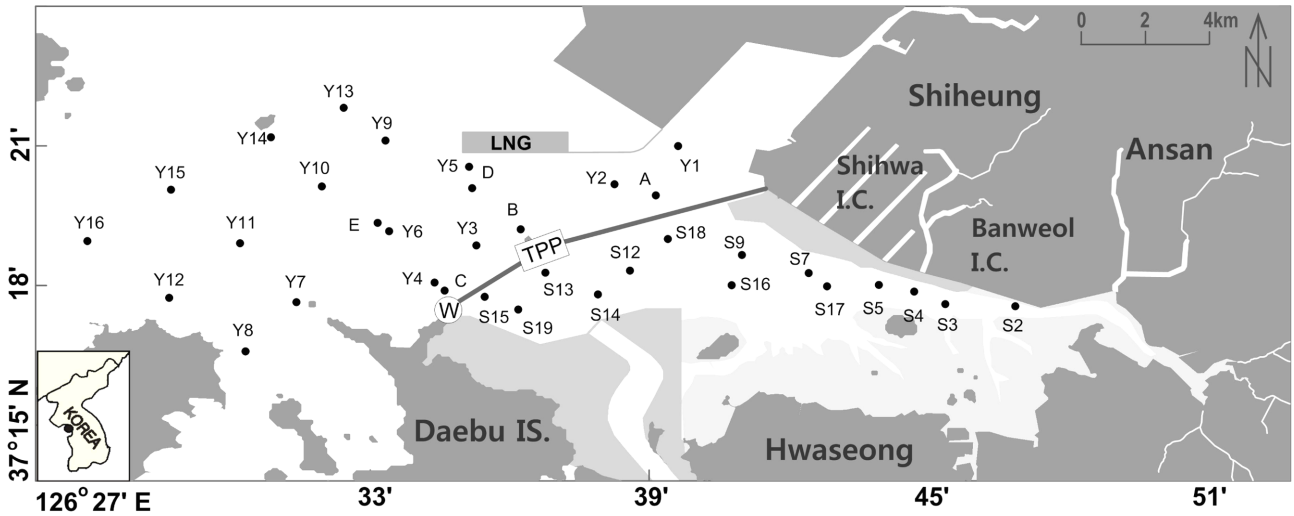


Fig. 1. Map of study area (abbreviation of W and TPP mean the watergate and tidal power plant, respectively).

월, 9월, 10월 및 11월)에 걸쳐 Niskin 채수기를 이용하여 표층수질과 저층수질을 월별로 조사하였다(Fig. 1). 표층수는 수심 0.5 m에서 저층수는 저층으로부터 1 m에서 채취하였다. 측정항목은 수온, 염분, 투명도, 용존산소(DO), 용존무기인(인산인), 용존무기질소(아질산질소, 질산질소, 암모니아질소) 및 클로로필-a였다. 수온 및 염분은 Multi parameter monitoring system(YSI-6600, USA)을 이용하여 현장에서 관측하였다. 투명도는 직경 30 cm의 투명도판을 이용하여 측정하였으며 저층 용존산소 포화도는 winkler법에 의하여 용존산소 농도를 측정 후 수온 및 염분을 이용하여 계산하였다. 용존영양염류 분석은 해수를 선상에서 미리 태운 유리섬유여과지(Whatman 47 mm GF/F)를 통하여 여과한 후, 여액을 채취하여 영양염 자동분석기(Bran+Luebbe QuAAtro, USA)로 측정하였다. 클로로필-a는 유리섬유 여과지로 현장에서 여과한 뒤 분해를 최소화하기 위해 MgCl₂를 몇 방울 떨어트린 후 90% 아세톤으로 추출하여 UV-VIS spectrometer(UV-2450, Shimadzu, Japan)으로 분석하였다(Strickland and Parsons[1972]). 용존무기인과 용존무기질소 분석의 정확도를 검증하기 위하여 캐나다 NRC사의 영양염 표준물질인 MOOS-2를 함께 분석하였으며 94.2-103.4%의 좋은 회수율을 나타내었다.

2.2 수질평가지수(Water Quality Index: WQI)

생태기반 수질평가지수는 저층 용존산소 포화도(DO, %), 식물플랑크톤 농도(chlorophyll-a), 투명도(secchi disk depth), 용존무기인(DIP) 및 용존무기질소(DIN)의 항목별 점수를 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \text{수질평가지수} &= 10 \times \text{저층 용존산소 포화도(DO)} + 6 \\ &\times \left[\frac{\text{식물플랑크톤농도(chlorophyll-a)} + \text{투명도(SD)}}{2} \right] + 4 \\ &\times \left[\frac{\text{용존무기질소 농도(DIN)} + \text{용존무기인 농도(DIP)}}{2} \right] \end{aligned}$$

Table 1. Criteria for score of each parameter for calculating the water quality index(WQI) in Korea

Score	Parameters	
	Chl-a (µg/L), DIN (µg/L), DIP (µg/L)	DO (saturation, %), Transparency (m)
1	below base	above base
2	< base + 0.10×base	>base - 0.10×base
3	< base + 0.25×base	> base - 0.25×base
4	< base + 0.50×base	> base - 0.50×base
5	≥ base + 0.50×base	≤ base - 0.50×base

수질평가지수의 항목별 점수 및 계산방법은 Table 1에 나타내었다. 항목별 기준값은 수질평가지수 항목의 해역별 기준값을 적용하며 본 연구에서는 서해중부 해역의 기준값인 Chl-a(2.2 µg/L), 저층 DO(90%), 표층 DIN(425 µg/L), 표층 DIP(30 µg/L) 및 투명도(1.0 m)를 사용하여 수질평가지수를 계산하였다. 수질평가지수는 I 등급(매우 좋음; WQI 23 이하), II 등급(좋음; WQI 24~33), III 등급(보통; WQI 34~46), IV 등급(나쁨; WQI 47~59) 및 V 등급(매우나쁨; WQI 60 이상)의 총 5단계의 등급으로 구분된다(국토해양부 고시 제 2011-972호).

3. 결과 및 고찰

3.1 시화호 내 · 외측 해역의 수질평가 지수 항목 농도의 시 · 공간 변화

2011~2012년 시화호 내측과 외측 해역에서의 수질평가 지수 항목의 각 조사시기별 평균, 최소 및 최대농도는 Table 2와 3에 나타내었다. 시화호 내측에서의 투명도는 여름철에는 강우 시 담수를 통한 부유물질의 유입 등으로 인하여 상대적으로 낮은 값을 보이고 있었다. 2011년 투명도의 전체 평균은 1.4 m로 2012년의 1.3 m와 큰 차이가 없었다(Table 2). 저층 용존산소 포화도는 시화호 내측에서 2011년 4월 111%의 평균을 보였으나 여름철로 갈수록 감

Table 2. Mean, minimum and maximum concentrations of transparency, DO saturation, DIP, DIN and Chl-a of seawater in Lake Shihwa during 2011~2012

Year	Month	Transparency (m)	DO (%)	DIP (mg/L)	DIN (mg/L)	Chl-a ($\mu\text{g/L}$)
2011	April	1.8 (0.8-3.0)	111 (99-168)	0.002 (0.001-0.010)	0.197 (0.017-0.234)	14.1 (2.6-140.5)
	June	1.3 (0.4-2.0)	52 (17-145)	0.024 (0.003-0.155)	0.030 (0.012-0.055)	23.1 (0.8-113.4)
	July	0.6 (0.3-1.5)	35 (3-79)	0.084 (0.032-0.129)	1.806 (1.466-2.238)	3.9 (1.0-5.0)
	August	1.0 (0.6-1.3)	70 (53-87)	0.014 (0.003-0.091)	0.727 (0.389-2.000)	27.5 (8.4-42.2)
	September	1.3 (0.4-2.2)	87 (49-154)	0.013 (0.002-0.063)	0.102 (0.004-0.443)	37.7 (19.2-195.2)
	October	2.2 (0.5-3.5)	99 (88-108)	0.045 (0.036-0.053)	0.320 (0.238-0.459)	9.0 (2.1-25.0)
	December	1.5 (0.3-2.1)	108 (98-120)	0.020 (0.001-0.066)	0.131 (0.083-0.504)	25.5 (3.5-155.2)
	Mean	1.4 \pm 0.5	80 \pm 29	0.029 \pm 0.028	0.493 \pm 0.621	21.3 \pm 10.2
	2012	May	1.1 (0.3-1.6)	112 (103-132)	0.005 (0.001-0.021)	0.101 (0.013-0.205)
June		1.4 (0.6-1.8)	113 (101-150)	0.008 (0.002-0.023)	0.108 (0.027-0.239)	13.5 (3.6-42.7)
July		1.0 (0.2-1.6)	97 (71-136)	0.017 (0.005-0.040)	0.414 (0.179-1.686)	121 (7.3-526)
August		0.9 (0.4-1.3)	79 (55-102)	0.056 (0.044-0.075)	0.743 (0.470-1.358)	4.2 (2.3-6.0)
September		1.3 (0.3-2.0)	84 (51-109)	0.034 (0.017-0.075)	0.819 (0.343-3.250)	11.1 (6.8-19.7)
October		1.5 (0.8-2.2)	87 (72-100)	0.042 (0.035-0.056)	0.387 (0.252-0.959)	3.1 (1.3-6.6)
November		1.7 (0.7-2.2)	95 (82-99)	0.033 (0.028-0.037)	0.183 (0.108-0.529)	4.7 (2.0-9.8)
Mean		1.3 \pm 0.3	95 \pm 13	0.028 \pm 0.019	0.394 \pm 0.293	24.7 \pm 42.7

소하여 7월에는 35%의 낮은 포화도를 나타내었다. 2012년에도 2011년과 유사하게 봄철에서 여름철로 갈수록 저층의 용존산소가 감소하였으나 감소폭은 2011년에 비해 작았다. 시화호 내측 저층 용존산소 포화도의 평균은 2011년과 2012년에 각각 80%와 95%로 나타나 조력발전소 가동으로 인하여 시화호 내·외측간의 해수 교환량이 증가하여 저층의 산소공급이 원활해 진 것을 알 수 있었다. 시화호 내측에서 영양염류의 주 공급원은 강우 시 하천이나 우수토구를 통한 유입이기 때문에 강우량이 많은 여름철에 상대적으로 높은 농도를 보였고(MTLM[2011]), 강우량이 적은 봄철에 상대적으로 낮은 농도를 나타내었다(Fig. 2, Table 2). 용존무기인의 평균농도는 2011년과 2012년에 각각 0.029 mg/L와 0.028 mg/L로 큰 차이가 없었다. 용존무기질소 역시 용존무기인과 마찬가지로 강우량이 많은 하계에 상대적으로 높은 농도를 보이고 있었고, 2011년(0.493 mg/L)에 비해 2012년(0.394 mg/L)에 약 80%의 수준으로 감소하였다(Fig. 2). 클로로필-a 농도는 여름철보다 봄철과 가을철에 상대적으로 높은 농도를 보였으며 2011년과 2012년에 각각 21.3 $\mu\text{g/L}$ 와 24.7 $\mu\text{g/L}$ 의 농도를 보이고 있었다.

시화호 외측에서 2011년과 2012년 투명도의 평균은 모두 1.6 m로 차이가 없었으나 조사시기에 따라 봄철이나 여름철에는 낮고 가

을철에는 상대적으로 높은 투명도를 보였다(Table 3). 외측의 저층 용존산소 포화도는 다른 조사시기에 비해 여름철이 상대적으로 낮았으나 내측과 같은 급격한 감소는 없었고 2011년(100% 포화도)에 비해 2012년(95% 포화도)에 약간 감소한 결과를 보였다. 외측 용존무기인의 평균은 2011년(0.035 mg/L)에 비해 2012년(0.031 mg/L)은 약 10% 평균농도가 감소하였으며, 용존무기질소는 2011년(0.454 mg/L)에 비해 2012년(0.376 mg/L)에 약 20% 정도 농도가 감소하였다. 그러나 용존무기인과 용존무기질소 모두 시화호 내측과 마찬가지로 강우로 인한 담수공급이 많았던 여름철에 상대적으로 높고 강우량이 적은 봄철에 낮은 농도를 보이고 있었다. 시화호 외측에서 클로로필-a의 평균농도는 2011년, 2012년 모두 평균 3.6 mg/L로 나타났으며 조사시기에 따른 큰 변동과 조사정점에 따른 큰 차이를 나타내었다(Fig. 2, Table 3).

시화호 조력발전소 정상가동 전(2011년)과 가동 후(2012년)의 수질을 비교하면 시화호 내측에서는 저층 용존산소 포화도 및 클로로필-a 농도 증가와 용존무기질소 농도의 감소를 나타내었으며, 시화호 외측에서는 용존무기인 및 용존무기질소의 농도가 감소하는 특징을 나타내었다. 저층 용존산소 포화도의 수평적인 분포를 살펴보면, 시화호 내측에서는 상류지역에서 낮고 시화방조제 및 배수갑

Table 3. Mean, minimum and maximum concentrations of transparency, DO saturation, DIP, DIN and Chl-a of seawater in outer sea of Lake Shihwa during 2011~2012

Year	Month	Transparency (m)	DO (%)	DIP (mg/L)	DIN (mg/L)	Chl-a (µg/L)
2011	April	0.8 (0.3-1.2)	108 (71-116)	0.013 (0.007-0.029)	0.362 (0.265-0.718)	5.1 (2.5-11.4)
	June	1.7 (0.8-2.5)	113 (90-121)	0.031 (0.003-0.278)	0.393 (0.164-1.866)	5.0 (3.0-5.0)
	July	1.6 (0.9-2.3)	90 (58-96)	0.041 (0.032-0.053)	0.719 (0.611-0.874)	2.4 (1.0-3.9)
	August	1.7 (1.1-2.4)	90 (82-101)	0.047 (0.038-0.076)	0.615 (0.494-0.830)	3.4 (1.4-8.5)
	September	1.8 (0.2-2.9)	111 (83-126)	0.032 (0.005-0.111)	0.332 (0.105-1.017)	4.5 (1.2-8.4)
	October	2.3 (1.1-3.9)	95 (91-102)	0.040 (0.020-0.088)	0.324 (0.162-0.826)	2.0 (1.2-3.3)
	December	1.1 (0.5-1.8)	91 (87-95)	0.039 (0.028-0.061)	0.432 (0.320-0.837)	2.9 (0.8-7.6)
	Mean	1.6±0.5	100±10	0.035±0.011	0.454±0.153	3.6±1.3
	2012	May	1.1 (0.4-1.7)	103 (94-106)	0.015 (0.015-0.043)	0.320 (0.198-0.608)
June		1.1 (0.5-1.8)	98 (88-104)	0.020 (0.010-0.057)	0.360 (0.189-0.719)	2.6 (0.8-4.0)
July		2.1 (1.0-3.6)	97 (89-101)	0.019 (0.005-0.038)	0.308 (0.195-0.524)	5.7 (1.4-12.9)
August		1.2 (0.5-1.9)	86 (81-90)	0.048 (0.039-0.070)	0.463 (0.350-0.719)	1.1 (0.6-1.6)
September		2.2 (0.7-3.5)	89 (78-105)	0.037 (0.014-0.074)	0.423 (0.250-0.722)	8.5 (2.4-16.8)
October		2.9 (1.5-4.5)	93 (83-111)	0.040 (0.026-0.128)	0.314 (0.207-1.152)	2.1 (1.0-4.1)
November		0.6 (0.3-1.1)	96 (92-99)	0.041 (0.035-0.058)	0.464 (0.358-0.832)	1.3 (0.4-2.0)
Mean		1.6±0.8	95±6	0.031±0.013	0.376±0.073	3.6±2.7

문 쪽에서 증가하는 경향을 보였고, 외측에서는 오이도 인근에서 낮고 외해역을 갈수록 높아지는 경향을 보이고 있었다(MTLM [2011]). 용존무기인 및 용존무기질소의 수평적인 농도분포는 시화호 내측의 상류지역과 외측의 하수처리장 방류구가 위치한 오이도 인근에서 높은 농도를 보였으며 시화방조제와 외해역으로 갈수록 점차 감소하는 경향을 나타내었다. 클로로필-a의 경우, 시화호 내측에서는 모든 조사시기에서 상류지역 및 호소의 중앙부에서 상대적으로 높은 농도를 보이고 배수갑문 및 시화방조제 쪽에서 감소하는 경향을 보였다. 외측의 경우, 봄철에 오이도 인근에서 LNG 기지 주변지역에서 클로로필-a의 농도가 상대적으로 높고 외해역으로 갈수록 감소하는 경향을 보였으나, 여름철에는 시화 방조제 북측 및 배수갑문 서측과 외해역에서 클로로필-a 농도가 높았고 오이도 인근 지역에서 낮은 농도를 나타내어 조사시기에 따라 공간적인 분포 특성이 차이가 있었다.

3.2 수질평가 지수를 이용한 시 · 공간 변화 특성 및 조력 발전소 가동에 따른 영향

2011년과 2012년 수질평가지수(WQI)의 수평분포 특성은 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. 2011년 4월 조사에서 시화호 내측과 외측

의 평균 WQI는 각각 30.5와 39.8로 외측이 내측에 비해 수질이 나쁜 것으로 나타났다. 수평적인 분포는 시화호 외측 오이도 주변 지역에서 V 등급의 수질을 보였으나 평균적으로 III 등급을 나타내었고, 내측은 대부분의 지역에서 II 등급에 해당되는 수질로 나타났다(Fig. 3). 6월 시화호 내측은 시화방조제 배수갑문 인근을 제외한 전 지역에서의 수질이 V 등급으로 나타났으며, 외측은 4월과 유사하게 오이도 주변에서 V 등급의 수질이였으나 이를 제외하고는 II~III 등급이었다. 6월 조사에서 평균 WQI는 내측이 64.8, 외측이 35.2로 외측은 4월에 비해 수질이 좋아졌으나, 내측은 4월에 비해 약 2.1배 WQI가 증가하였다(Table 4). 내측에서 6월 WQI의 증가는 저층 용존산소 포화도 감소 및 투명도 증가가 영향을 미치고 있었다. 시화호 내측 7월의 수질은 모든 조사지역에서 V 등급에 해당되며 WQI의 평균은 87.7로 4월에 비해 약 3배 증가하였으며 WQI의 증가는 투명도, 용존무기인 및 용존무기질소가 큰 폭으로 증가하였기 때문이다(Fig. 3, Table 4). 외측의 공간분포는 시화방조제 주변에서 IV 등급의 공간분포를 보였고 외해역은 III 등급을 나타내었다. 7월 외측의 평균 WQI는 42.3으로 4월의 39.8과 큰 차이가 없었으나 7월이 4월에 비해 투명도와 클로로필-a 농도는 감소하였으나 용존무기인과 용존무기질소의 농도가 급격히 증가하는

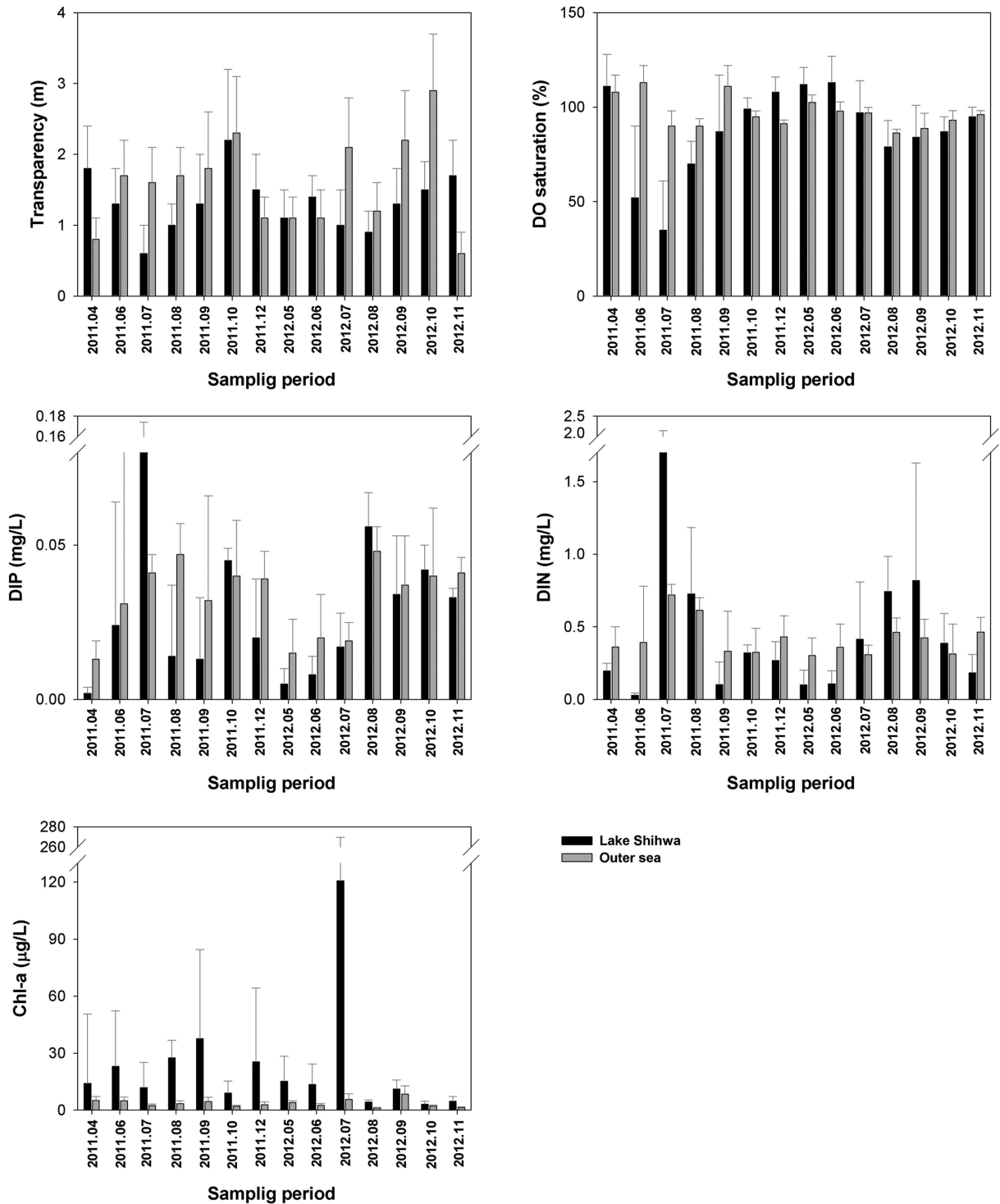


Fig. 2. Comparison of mean concentrations of transparency, DO saturation, DIP, DIN and Chl-a in different sampling period.

특징을 나타내었다(Table 3, 4).

8월 시화호 내측은 시화호 상류지역에서 중앙부까지 V 등급을 나타내었고, 나머지 지역은 7월에 비해 수질이 개선되어 III-IV 등급을 보였다. 내측의 8월 평균 WQI는 63.1로 투명도, 저층 용존산소 포화도, 용존무기인, 용존무기질소의 감소로 인하여 7월(87.7)에 비해 큰 폭으로 감소하였다. 외측 8월의 평균 WQI는 45.0으로

7월에 비해 약간 증가하였으며, 오이도에서 배수갑문 주변까지는 IV 등급을 외해역은 III 등급의 수질을 나타내었다. 9월 조사의 경우, 내측과 외측의 평균 WQI는 각각 51.4와 36.3이었다. 특히 내측은 7월(87.7)과 8월(63.1)에 비해 수질상태가 크게 개선된 것을 알 수 있었다. 내측에서는 반월산업단지 주변의 상류지역, 외측에서는 하수처리장 방류수가 유출되는 오이도 주변에서 각각 V 등급과

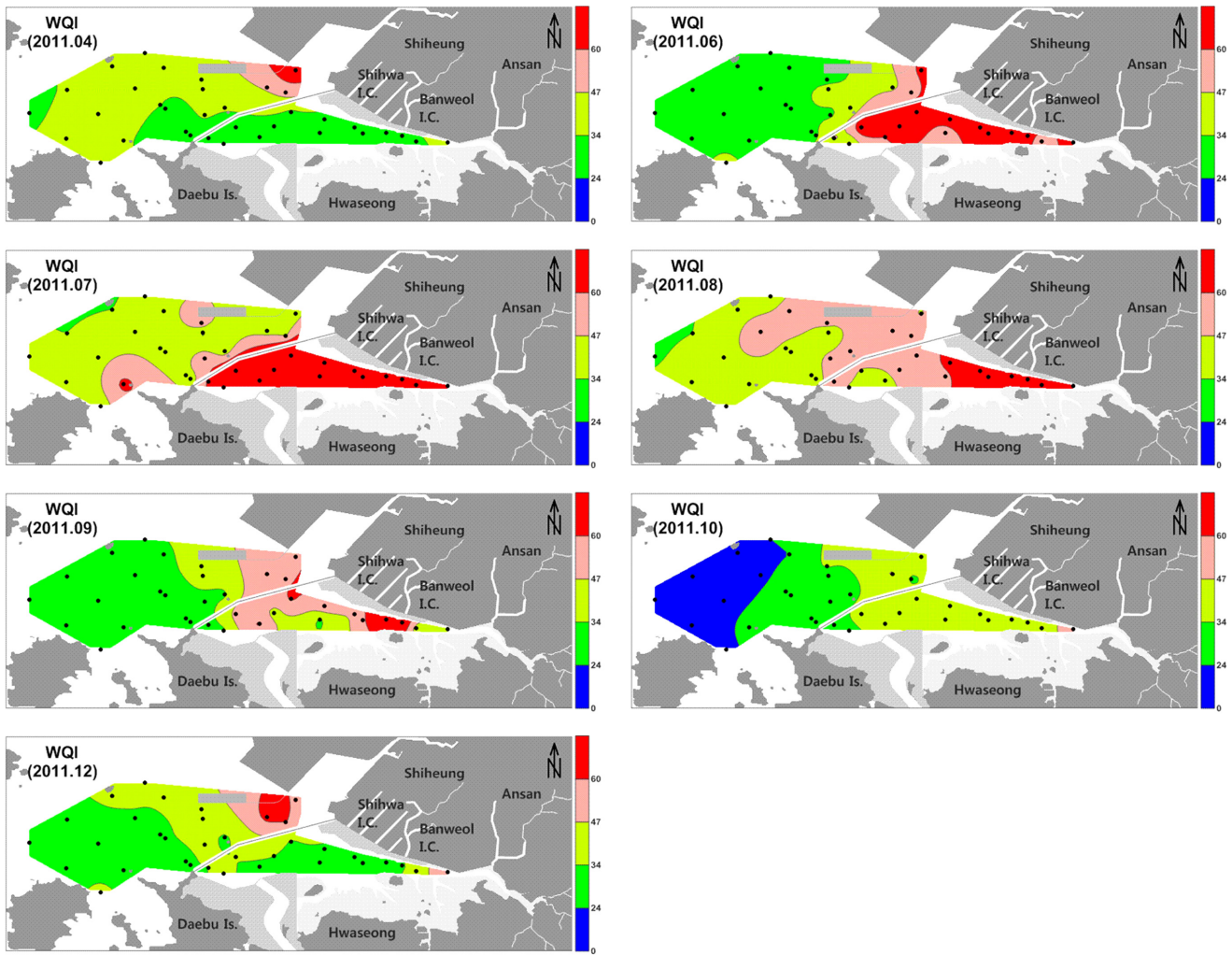


Fig. 3. Spatial distribution of water quality index (WQI) for Lake Shihwa and outer sea in 2011.

IV 등급의 수질을 나타내고 있었다(Fig. 3). 10월 시화호 내측과 외측에서 평균 WQI는 각각 38.7과 26.7로 여름철에서 가을철로 갈수록 WQI가 감소하고 있어 수질이 점차적으로 개선되고 있는 것을 알 수 있었다. 10월 내측은 9월에 비해 평균 WQI가 감소하였고 용존무기인의 농도 증가 및 저층 용존산소 포화도 감소의 특징을 나타내고 있었다. 내측에서의 공간적인 분포는 반월 산업단지 주변인 최 상류지역의 1개 정점에서만 IV 등급이었고 나머지 지역은 III 등급의 수질상태를 보였다. 외측 역시 여름철에 비해 수질이 개선되어 오이도 주변 지역과 외해역에서는 각각 III 등급과 II 등급을 나타내었다. 12월 시화호 내측과 외측의 WQI 평균은 각각 35.1과 36.4로 내측은 10월에 비해 감소하였으나 외측은 10월에 비해 WQI가 약 10 정도 증가하였다(Table 4). 외측에서 WQI의 증가는 클로로필-a의 농도가 증가하였기 때문이다. 공간적인 분포특성은 내측에서는 10월 조사와 마찬가지로 최 상류지역의 정점에서는 여전히 나쁨에 해당되는 IV 등급을 나타내었고 대부분의 조사지역에서는 II~III 등급의 수질을 나타내고 있었다(Fig. 3). 외측에서는 오이도 주변에서는 V 등급을 나타내었으며 외해역으로 갈수록 수질이 좋

아지고 있는 것으로 나타났다. 2011년 시화호 내측에서의 WQI는 7월이 가장 높았고 12월로 갈수록 점차 감소하는 경향을 나타내었다. 시화호 조력발전소는 2011년 7월 시험가동을 시작하였고, 12월부터 정상가동을 시작하였다. 2011년 8월 조사에서 저층 용존산소 포화도는 87%로 가장 포화도가 낮은 7월 이후 점차적으로 증가하였다(Table 2). 그러나 2010년 8월 내측 평균 저층 용존산소 포화도는 10% 이하로 빈산소 환경이 발달하였으며, 조력발전소 인근 수심이 깊은 지역은 0%의 용존산소 포화도를 나타내었다. 또한 10월 저층 용존산소 포화도는 상류지역에서는 14.3%에 불과해 봄철에 발생된 저층의 빈산소 환경이 가을철까지 지속되는 것으로 보고된 바 있다(MLTM[2010]). 따라서 조력발전소 시험가동 중이었던 2011년 7월 이후 내측 WQI의 감소는 조력발전소의 가동에 따라 외해수와외의 해수교환을 증가로 인하여 저층의 빈산소 환경을 개선시켰기 때문으로 판단된다.

2012년 5월 시화호 내측과 외측에서 평균 WQI는 각각 34.1과 33.9로 보통에 해당되는 III 등급의 수질을 나타내었다(Table 4). WQI의 수평분포는 내측의 경우 모든 정점에서 II~III 등급의 수질

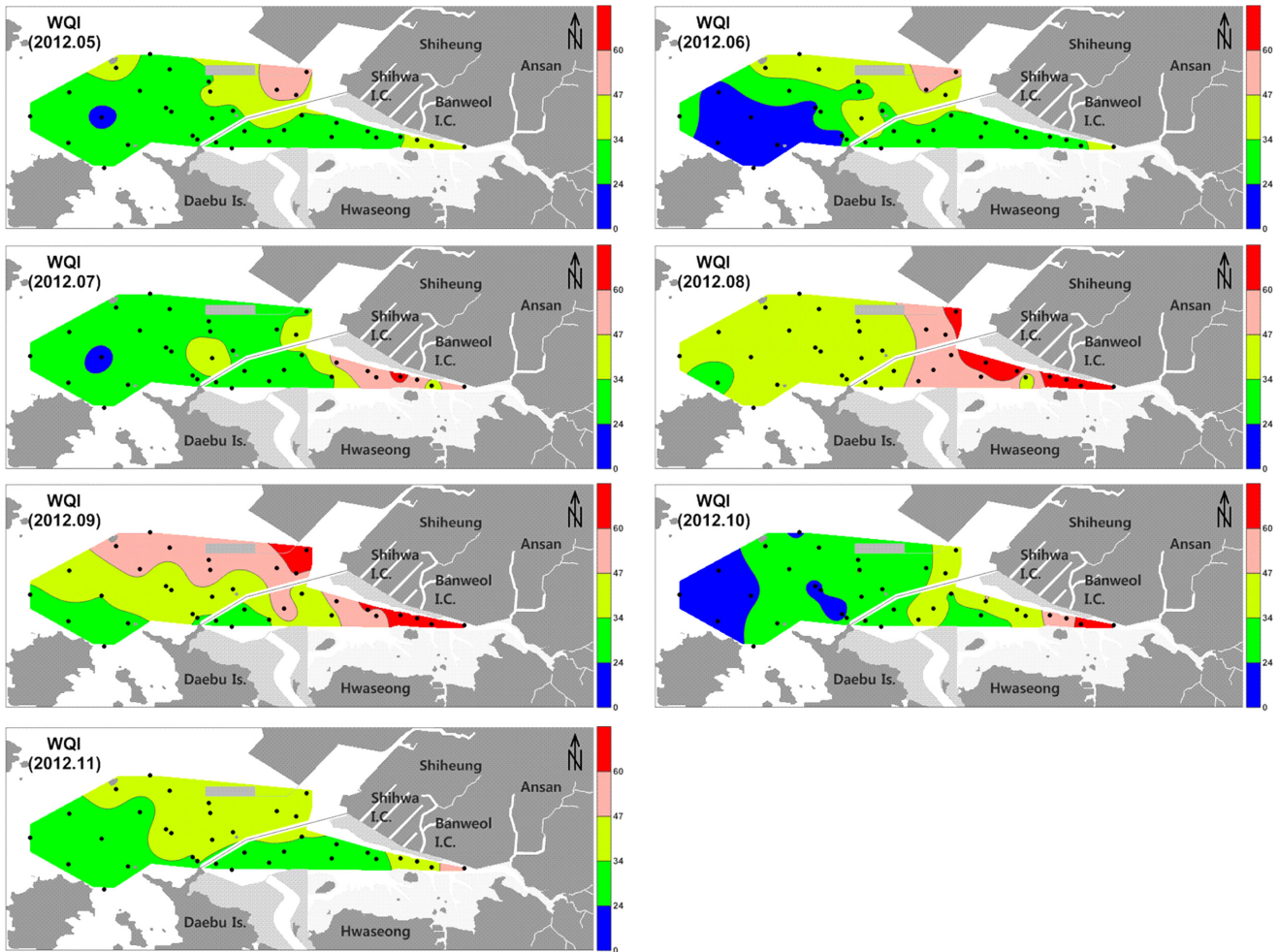


Fig. 4. Spatial distribution of water quality index (WQI) for Lake Shihwa and outer sea in 2012.

이었고 외측에서는 오이도 주변만이 IV 등급으로 수질이 나빴으며 나머지 정점은 내측과 마찬가지로 II~III 등급의 수질상태를 나타내고 있었다(Fig. 4). 6월 내측에서 평균 WQI는 32.6으로 5월과 유사하였다. 2011년 6월 내측에서 저층 용존산소 포화도의 급격한 감소로 인하여 평균 WQI가 64.8로 급격히 증가하였으나 2012년에는 6월에 저층 용존산소 포화도의 감소가 관측되지 않았다(Table 2, 4). 외측의 경우, 6월 평균 WQI는 31.6으로 내측과 마찬가지로 5월에 비해 감소하였으며 외해역은 I 등급에 해당되는 매우 좋은 수질 상태를 나타내었다. 그러나 여전히 오이도 주변에서는 수질이 IV 등급으로 나타났다. 6월 조사의 경우, 내측에서 평균 WQI는 2011년 (64.8)에 비해 2012년(32.6)에 50% 수준으로 감소하였다. 외측 역시 2011년 평균 WQI가 35.2이었으나 2012년에는 31.6으로 약 10% 정도 감소하였다(Table 4). 따라서 조력발전소 정상가동 이후 외해수의 유입으로 인하여 저층에 산소공급이 원활해진 것이 수질개선 효과로 나타난 것으로 판단된다. 7월 조사에서 내측의 평균 WQI는 43.0으로 나타났다. 2011년 7월 내측의 평균 WQI는 87.7이었으나 조력발전소 전면가동 이후인 2012년 7월에는 예년에 비해 50% 수준으로 WQI가 감소하였다. 내측 7월 평균 WQI는 2011년

매우 나쁨에 해당되는 V 등급에서 2012년 좋음에 해당되는 III 등급으로 수질이 크게 개선된 것으로 나타났다. 공간적인 분포는 2011년의 경우 내측 전체가 V 등급이었으나(Fig. 3), 2012년에는 상류 지역만이 IV 등급에 해당되며 중앙지역은 III 등급, 방조제 주변 지역은 II 등급의 수질을 나타내었다(Fig. 4). 2012년 7월 외측의 평균 WQI는 31.8로 2011년의 42.3에 비해 WQI가 감소하였고 보통에 해당되는 III 등급에서 좋음에 해당되는 II 등급으로 수질이 개선되었다. 2012년 8월 내측 WQI의 평균은 60.3으로 2011년 같은 조사시기처럼 높은 WQI를 나타내었으며 조력발전소 인근을 제외하고는 IV~V 등급에 해당되는 수질상태를 나타내었다. 조력발전소가 시험가동을 시작한 2011년 7월에서 8월로 갈수록 내측의 WQI는 감소하였으나, 2012년에는 7월에서 8월로 갈수록 오히려 WQI가 증가하였다(Table 4). 이러한 이유는 2011년에는 8월이 7월에 비해 용존무기인과 용존무기질소의 농도가 감소하였으나 2012년에는 이들 농도가 증가하였기 때문이다. 2012년 8월 내측 WQI의 수평분포는 조력발전소가 시험가동 중이었던 2011년과 유사한 경향을 보여, 집중강우로 인해 하천을 통한 비점오염물질의 과다유입의 영향으로 인하여 8월이 다른 조사시기에 비해 수질이 나빠진 것

Table 4. Comparison of mean score values for each measured parameter(transparency, DO saturation, DIP, DIN and Chl-a) and water quality indices between Lake Shihwa(SH) and outer sea of Lake Shihwa(SHO) during 2011~2012

Year	Month	Transparency		DO		DIP		DIN		Chl-a		WQI	
		SH	SHO	SH	SHO	SH	SHO	SH	SHO	SH	SHO	SH	SHO
2011	April	1.1 (0.5)	3.0 (1.3)	1.0 (0)	1.1 (0.4)	1.0 (0)	1.0 (0)	1.0 (0.1)	1.6 (1.4)	4.4 (0.7)	4.8 (0.5)	30.5 (3.1)	39.8 (9.5)
	June	1.9 (0.4)	1.2 (0.5)	4.1 (1.5)	1.0 (0.2)	1.5 (1.1)	1.8 (1.6)	1.0 (0)	1.7 (1.5)	4.4 (1.4)	4.7 (0.6)	64.8 (14.9)	35.2 (8.7)
	July	3.9 (1.7)	1.1 (0.3)	4.5 (0.9)	1.4 (0.7)	4.6 (1.1)	3.9 (0.8)	5.0 (0)	4.9 (0.3)	3.9 (1.5)	2.5 (1.5)	87.7 (12.0)	42.3 (8.1)
	August	2.2 (1.5)	1.0 (0)	3.2 (0.8)	1.4 (0.5)	1.3 (1.1)	4.4 (0.5)	3.4 (1.5)	4.1 (0.7)	5.0 (0)	3.6 (1.7)	63.1 (14.4)	45.0 (8.2)
	September	2.3 (1.4)	1.6 (1.4)	2.4 (1.3)	1.1 (0.4)	1.6 (1.5)	2.2 (1.8)	1.1 (0.3)	1.8 (1.4)	5.0 (0)	4.0 (1.7)	51.4 (15.6)	36.3 (9.4)
	October	1.3 (0.8)	1.0 (0)	1.1 (0.3)	1.0 (0)	4.4 (0.6)	3.0 (1.5)	1.1 (0.3)	1.5 (1.2)	4.4 (1.3)	1.5 (1.1)	38.7 (6.1)	26.7 (7.3)
	December	1.5 (1.3)	1.5 (1.1)	1.0 (0)	1.2 (0.4)	1.6 (1.2)	3.4 (0.9)	1.1 (0.5)	1.8 (1.4)	5.5 (0)	3.2 (1.5)	35.1 (6.5)	36.4 (11.5)
	Mean	2.0 (0.9)	1.5 (0.7)	2.5 (1.5)	1.2 (0.2)	2.2 (1.6)	2.8 (1.2)	2.0 (1.6)	2.5 (1.4)	4.6 (0.4)	3.5 (1.2)	53.0 (20.3)	37.4 (5.9)
	May	1.7 (1.4)	1.8 (1.3)	1.0 (0)	1.0 (0)	1.0 (0)	1.3 (0.9)	1.0 (0)	1.4 (1.0)	5.0 (0)	4.4 (1.0)	34.1 (4.3)	33.9 (8.0)
	June	1.4 (0.3)	1.6 (1.1)	1.0 (0)	1.1 (0.4)	1.0 (0)	1.5 (1.3)	1.0 (0)	1.6 (1.4)	5.0 (0)	3.0 (1.7)	32.6 (2.4)	31.6 (10.5)
2012	July	2.3 (1.6)	1.0 (0)	1.5 (0.8)	1.0 (0.2)	1.4 (0.9)	1.1 (0.7)	1.6 (1.4)	1.1 (0.4)	5.0 (0)	4.6 (1.0)	43.0 (12.2)	31.8 (4.5)
	August	2.1 (1.4)	1.7 (1.3)	2.4 (1.0)	2.0 (0.3)	4.9 (0.4)	4.7 (0.5)	4.4 (0.8)	2.2 (1.2)	4.5 (0.9)	1.0 (0)	60.3 (17.9)	41.9 (7.6)
	September	1.7 (1.4)	1.1 (0.7)	2.3 (1.1)	1.8 (0.7)	2.4 (1.8)	2.8 (1.6)	2.7 (1.9)	2.0 (1.4)	5.0 (0)	4.6 (0.9)	53.3 (20.0)	44.2 (11.2)
	October	1.3 (0.7)	1.0 (0)	1.8 (0.9)	1.0 (0.2)	3.9 (0.9)	2.8 (1.3)	1.8 (1.5)	1.3 (1.0)	3.1 (1.8)	1.8 (1.2)	42.2 (14.4)	27.0 (6.6)
	November	1.4 (1.1)	3.7 (1.5)	1.1 (0.4)	1.0 (0)	2.4 (0.8)	3.9 (0.6)	1.1 (0.5)	2.3 (1.1)	3.8 (1.5)	1.0 (0)	34.1 (8.4)	36.4 (6.7)
	Mean	1.7 (0.4)	1.7 (0.9)	1.6 (0.6)	1.3 (0.4)	2.4 (1.5)	2.6 (1.4)	1.9 (1.2)	1.7 (0.5)	4.5 (0.8)	2.9 (1.7)	42.8 (10.6)	35.3 (6.1)

으로 나타났다. 2012년 외측 WQI의 평균은 41.9로 내측과 마찬가지로 7월에 비해 증가하였으며 수평적인 분포는 오이도 주변에서 V 등급을 나타내고 외해역으로 갈수록 수질이 좋아지고 있었다. 2012년 8월이 7월에 비해 내측과 외측 모두 WQI가 증가한 원인은 저층 용존산소 포화도, 용존무기인, 용존무기질소가 증가하였기 때문으로 앞서 설명한 경우를 통한 시화호 유역 비점오염물질의 공급이 큰 영향을 미쳤기 때문으로 판단된다. 2012년 9월 시화호 내측과 외측에서 평균 WQI는 각각 53.3과 44.2로 8월에 비해 내측은 WQI가 감소하였고 외측은 오히려 WQI가 증가하였다. 9월 내측과 외측의 수질은 평균적으로 각각 IV 등급과 III 등급으로 내측에서의 수질이 외측에 비해 나쁜 것으로 나타났다(Table 4). 2012년 9월 내측의 공간적인 분포는 상류지역에서 V 등급을 보이나 시화호 방조제로 갈수록 수질이 좋아져 조력발전소 가동으로 인한 해수유통의 영향을 가장 크게 받는 조력발전소 및 배수갑문 인근에서는 III 등급을 나타내었다(Fig. 4). 2012년 9월 외측은 총 7회의 조사시기 중 가장 높은 WQI를 보이고 있었다. 이는 8월에 비해 용존무기인 및 용존무기질소의 농도는 감소하였으나 영양염류의 공급으로 인

하여 기초생산력이 높아져 클로로필-a의 농도가 증가하였기 때문이다(Table 3). 2012년 10월 조사에서 내측과 외측의 평균 WQI는 각각 42.2와 27.0으로 9월에 비해 감소하였으나 내측은 2011년에 비해 WQI가 증가하였다(Table 4). 내측에서 WQI의 공간분포는 9월과 마찬가지로 최상류지역은 V 등급이었으며, 상류지역인 신길천 주변에서 IV 등급의 수질을 보였고 나머지 지역은 II~III 등급으로 나타났다(Fig. 4). 10월 외측에서는 I~III 등급의 수질상태를 보였으며 2011년과 유사한 수평분포를 나타내었다. 2011년 11월 조사에서 내측과 외측의 평균 WQI는 각각 34.1과 36.4로 외측이 내측에 비해 수질이 좋지 않은 것으로 나타났으며 이는 투명도, 용존무기인 및 용존무기질소의 농도가 내측에 비해 높았기 때문이다(Table 4). 2012년 역시 2011년과 마찬가지로 내측과 외측 모두 여름철 이후 점차적으로 수질이 좋아지고 있는 것으로 나타났다.

3.3 수질평가지수의 변화 요인 및 군집분석

2011년과 2012년 조사시기별 시화호 내측과 외측의 WQI의 변동 및 안산지역의 월별 강우량 변동을 Fig. 5에 나타내었다. 시화

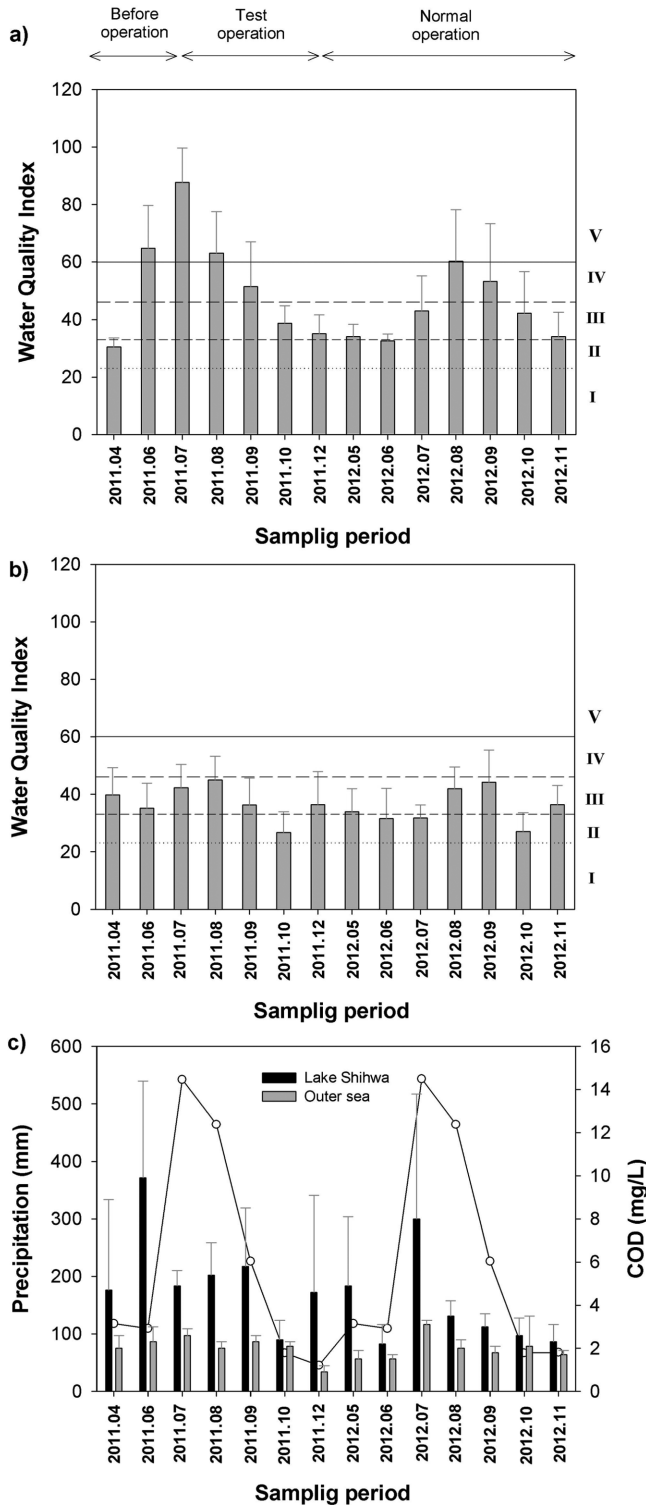


Fig. 5. Comparison of water quality index for Lake Shihwa (a), outer sea (b), precipitation and COD concentrations (c) during 2011-2012.

호 내측에서 WQI는 4월에서 7월로 갈수록 증가한 이후 감소하는 경향을 보이고 있었다. 시화호 내측 및 외측 각 수질항목의 항목별 점수를 비교하면, 투명도의 경우 시화호 내측은 4월(1.1)에서 7월(3.9)로 갈수록 증가하였으며 저층산소포화도 역시 4월(1.0)에서 7

월(4.5)까지 증가하였다(Table 4). 2011년과 2012년 안산지역의 연간 강우량은 각각 1,764 mm와 1,700 mm로 여름철인 7월과 8월의 월간 누적강우량이 1,007 mm와 1,008 mm로 나타나 연간 총 강우량 중 각각 57.1%와 59.3%를 차지하였다(Fig. 5). 강우를 통한 유입이 많았던 7월 조사에서 DIP 및 DIN의 항목별 점수 역시 각각 4.6과 5.0으로 4월 조사에 비해 급격히 증가한 것을 알 수 있었다. 2012년 역시 5월에서 8월로 갈수록 WQI가 점차적으로 증가하였으며 투명도, 저층 용존산소 포화도, DIP, DIN 및 클로로필-a등 모든 조사항목의 항목별 점수가 큰 폭으로 증가하였다. 2011년과 2012년 시화호 내측 WQI의 변동은 봄철에서 여름철로 갈수록 급격히 증가하고 있으며 시화호 외측 역시 여름철 조사시기에 큰 폭으로 WQI 값이 증가하는 경향을 보였다(Fig. 5). 따라서 여름철 수질악화는 강우를 통한 비점오염물질의 영향을 크게 받고 있는 것으로 판단된다. 이전 연구에 의하면 시화호 유역 반월산업단지의 우수토구를 통하여 강우가 많은 하계 조사시기인 7월 1회 강우시 부유물질 187,536 kg, 화학적산소요구량 17,188 kg, 총인 922 kg 및 총질소 13,519 kg의 유기물과 영양염류가 유출된다고 조사되었다(Ra *et al.* [2011]). 시화호 유역의 연간 강우일수, 총 강우량 및 유역은 총 면적을 고려할 때 막대한 양의 비점오염물질이 비점오염원의 형태로 시화호 내측으로 유출되어 수질악화의 원인이 되고 있는 것을 알 수 있었다.

시화호 내측에서 WQI의 평균은 2011년과 2012년 각각 53.0과 42.8로 평균적으로 나쁨에 해당되는 IV 등급이었으나 2012년에는 보통에 해당되는 III 등급으로 나타나 수질이 상당히 개선된 것으로 나타났다. 시화호 조력발전소는 2011년 7월 시험가동을 시작하였으며 12월부터 정상가동 중에 있다. 조력발전소 가동 이전에는 배수갑문을 통하여 2천4백만 톤/일의 해수교환을 실시하였으나, 정상 가동 이후 1억6천만 톤/일로 해수유통량이 크게 증가하였다. 2011년과 2012년을 비교하면, 시화호 내측에서는 클로로필-a와 용존무기인 및 용존무기질소는 큰 차이가 없으나 투명도와 저층의 용존산소 포화도에 대한 점수가 크게 감소하였다(Table 4, Fig. 6). 이는 조력발전소의 운영을 통해 외해수와 외해수 유통이 증가하여 시화호 내측의 고질적인 환경문제였던 저층의 빈산소 혹은 무산소 환경이 크게 개선되었기 때문으로 사료된다. 수질평가지수 계산식에서도 저층 용존산소 포화도의 점수가 1이 변하면 WQI가 10이 변한다. 다른 분석항목 역시 점수가 1이 변한다고 가정하면, 클로로필-a 및 투명도는 WQI가 3이 변하고, 용존무기인 및 용존무기질소는 WQI가 2가 변하고 있다. 결과적으로 조력발전소 가동 이후 내측 저층에 산소공급이 원활해짐에 따라 시화호 내측에서 WQI 변동에 가장 큰 영향을 주는 항목은 저층 용존산소 포화도인 것을 알 수 있었다(Fig. 6).

시화호 외측의 경우, 저층 용존산소 포화도는 2011년 1.0~1.4로 조사시기에 따른 변동이 작았으며 DIP, DIN 및 클로로필-a가 조사시기에 따른 변동이 심하였고 이들의 농도가 높았던 시기에 수질이 악화된 것을 알 수 있었다. 조력발전소가 정상 가동한 2012년 시화호 외측에서 분석항목의 평균 점수는 2011년에 비해 투명도,

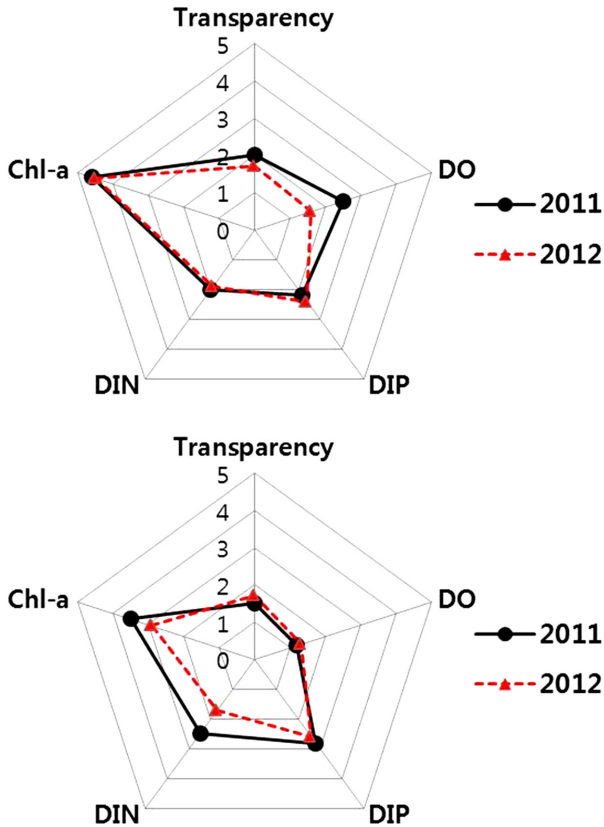


Fig. 6. Comparison of mean scores for each parameter in seawater from Shihwa Lake (upper) and outer sea (lower) during the period of 2011-2012.

저층 용존산소 포화도는 증가하였고, 용존무기인, 용존무기질소 및 클로로필-a는 감소한 것으로 나타났다(Table 4, Fig. 6). 시화호 조력발전소는 단류식 창조발전으로 시화호 외측에서 내측으로 수위 차에 의한 발전이 이루어지며 가동 이후 6개의 배수갑문으로 내측 해수의 외측 방류로 인한 외해역의 오염 우려가 제기되었다. 본 연구에서 조력발전소가 정상 가동한 2012년 외측의 평균 WQI가 35.3으로 2011년의 37.4에 비해 약간 감소하였으며 모두 보통에 해당되는 III 등급의 수질상태를 나타내고 있어 내측 해수의 외측 방류로 인한 외해역의 오염이 미미한 것을 알 수 있었다. 아울러 외측에서 WQI의 수평적인 분포 특성 역시 모든 조사시기에서 조력발전소 주변 지역보다는 오이도 주변 하수처리장 방류구 해역에서 상대적으로 높은 WQI를 나타내었으며 WQI 변동에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 방류구를 통한 용존무기인 및 용존무기질소로 나타나 이를 뒷받침 하고 있다.

수질평가지수와 직접적인 상관은 없지만 오염부하량과 연계된 조사시기별 시화호 내측 표층수 COD 농도는 Fig. 5에 나타내었다. 2011년 내측 COD 농도는 6월에서 평균 9.9 mg/L로 가장 높았으며 10월 조사가 2.4 mg/L로 낮은 평균농도를 나타내었다. 2012년의 경우, 강우량이 많았던 7월 조사에서 8.0 mg/L의 평균농도를 보여 다른 조사시기에 비해 높았다. 2011년과 2012년 내측 COD의 평균 농도는 각각 5.38 mg/L와 3.78 mg/L로 조력발전소가 정상 가동 이

후 COD 농도가 감소하여 수질개선 효과를 나타내고 있다. 그러나 외측 COD의 평균은 2011년 2.03 mg/L에서 2012년 1.96 mg/L로 WQI와 유사하게 감소하고 있어 내측 해수의 외해방류로 인한 오염은 미미한 것을 알 수 있었다. 안산지역 강우량과 분석항목간에 상관성은 다음과 같다. 내측의 경우, 강우량이 투명도($r=-0.792, p<0.01$), 용존무기질소($r=0.699, p<0.01$), 저층 용존산소 포화도($r=-0.533, p<0.05$)와 양호한 상관성을 나타내었다. 또한 용존무기인 및 용존무기질소간에도 양호한 상관성($r=0.782, p<0.01$)을 보였다. COD는 클로로필-a와 양호한 상관성($r=0.600, p<0.05$)을 나타냈으며 다른 분석항목과는 상관성이 낮은 것으로 나타나 강우를 통한 비점오염물질의 직접적인 영향보다는 자체 생산된 유기물과 밀접한 관련이 있음을 알 수 있었다. 외측 역시 내측과 마찬가지로 용존무기인과 용존무기질소간에는 양호한 상관성($r=0.568, p<0.05$)을 나타내었으며, 강우량은 용존무기질소($r=0.555, p<0.05$) 및 COD($r=0.636, p<0.05$)와 양호한 상관성을 나타내고 있었다. 따라

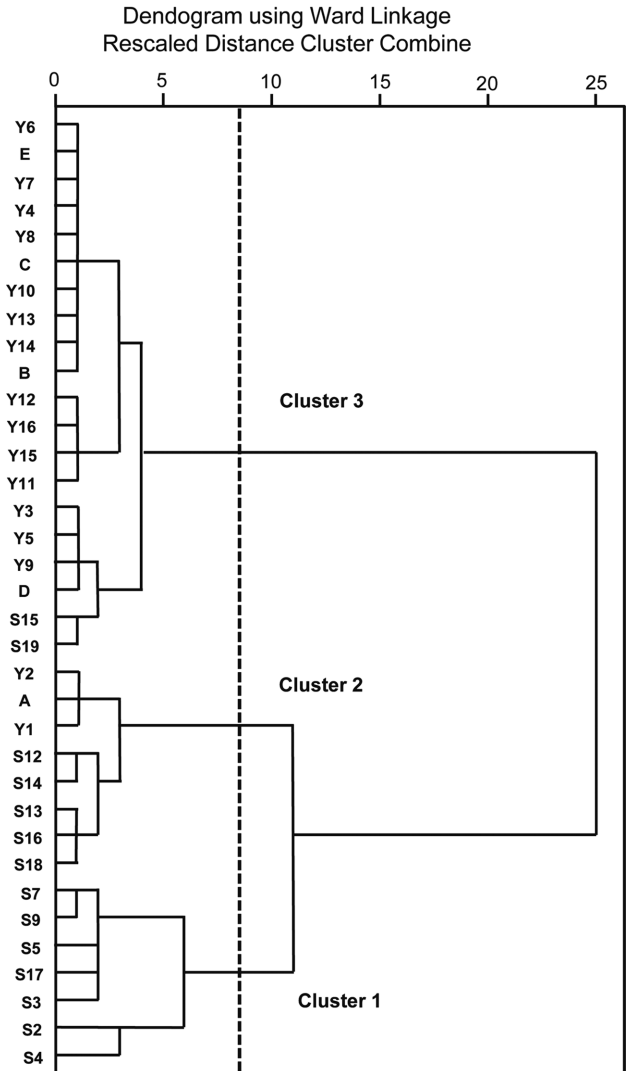


Fig. 7. Hierarchical cluster analysis results at whole sites in the present study.

서 내측과 외측 수질 모두 강우를 통한 비점오염물질 유입에 영향을 받고 있음을 알 수 있었다.

시화호 내측과 외측의 정점에 따른 공간분포를 설명하기 위하여 계층적 군집분석(hierarchical cluster analysis)을 실시하였으며 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 군집분석 결과는 시화호 내측과 외측의 모든 정점에서의 WQI 수준에 따라 3개의 주요한 cluster로 구분된다. WQI는 시화호 상류지역인 정점 S2, S3, S4, S5, S7, S9 및 S17이 cluster 1로 나뉘며 이들 조사정점은 반월천, 안산천 및 화정천 등을 통한 하천수 유입과 시화 및 반월산업단지 주변 우수토구에 의한 오염물질 유입의 영향을 가장 민감하게 받는 지역이다. 시화호 내측의 상류지역(정점 S2~S5, S17)은 총 14회의 모든 조사시기에서 평균 WQI가 55.2로 나쁨 등급(IV 등급)의 수질상태로 나타나 반월 및 시화 산업단지를 통한 오염물질의 유입으로 인한 탁도 증가, 유기물 분해과정의 저층의 산소고갈 및 용존영양염류의 공급 등이 수질을 악화시키고 있는 것으로 판단된다. 시화호 내측 중앙부의 정점 S12, S13, S14, S16 및 S18과 함께 시화호 외측 오이도 주변의 Y1, Y2 및 A 정점은 cluster 2로 구분되었다. 내측 중앙지역 역시 평균적으로 42.8의 WQI를 나타내어 III 등급인 보통의 수질상태이었으나 하계 조사시기에는 IV 등급의 나쁨의 수질상태를 보였다. 또한 외측의 경우, 오이도에 가까운 정점 Y1 역시 모든 조사시기에서 IV 등급 이상의 수질 등급으로 나타났다. 또한 인근인 Y2와 A 정점 역시 총 14회 중 13회의 조사시기에서 나쁨 이상의 수질 등급(평균 WQI 48.9)을 나타내고 있었다. 시화호 외측의 Y1 인근에는 소래포구 등 연안을 통한 오염물질의 유입과 함께 시화 및 안산하수처리장 방류구가 위치하여 용존영양염의 농도가 상대적으로 높은 특성을 보였다. 본 연구 결과를 통해 시화호 중앙지역과 외측의 오이도 인근은 유사한 수질등급에 해당되는 것을 알 수 있었다. Cluster 3은 시화호 외측의 오이도 인근(Y1, Y2 및 A 정점)을 제외한 모든 정점과 시화호 방조제 서쪽 끝에 위치한 배수갑문 인근인 S15와 S19를 포함하고 있으며 평균 WQI는 33.0으로 평균적으로 보통의 수질상태를 보이고 있었다. 따라서 시화호 내측의 배수갑문 인근 지역은 조력발전소 가동에 따른 수질개선효과가 가장 크며 외측과 유사한 수질을 보이는 것을 알 수 있었다.

시화호 연안오염총량관리를 위한 유역모델링 결과에 의하면, 도시유역의 관거불명수는 우수관망의 노후, 파손, 오접 등에 의해 발생하는 부하량으로 COD 470 kg/일, TN 107.5 kg/일, TP 9.4 kg/일로 보고되었다. 또한 시화호 유역의 총 유출량 중 강우시 비점 유출량이 96.7%를 차지하며 4.5%는 하수처리장에 의해 차집되고 95.5%인 2.9억 톤/년이 시화호로 유입된다고 보고된 바 있다(MTLM[2012]). 본 연구를 통해 여름철에 시화호 내측에 위치한 하천들과 반월산업단지 내 우수토구를 통한 부유물질, 유기물 및 용존 영양염류 등의 비점오염물질 유입의 영향을 크게 받고 있는 상류지역에서는 조력발전소 가동에도 불구하고 여전히 수질이 크게 개선되지 않는 것으로 나타났다. 그러나 평균 수질평가지수(WQI)는 조력발전소 가동 이후 큰 폭으로 감소하였고, 시화호 상류지역을 제외한 일부 조사정점에서는 수질이 상당히 개선되고 있어 조력발

전소의 가동은 시화호 내측의 수질개선에 큰 역할을 하고 있는 것으로 판단된다. 또한 조력발전소 가동에 따라 시화호 내측의 저층 퇴적물이 재 부유되어 외해로 확산됨으로써 시화호 외측의 수질이 악화될 것으로 예상되었으나 본 연구결과를 통해 외측의 오염은 미미한 것을 알 수 있었다. 그러나 향후 지속적인 모니터링으로 시화호 내측과 외측 수질 뿐만 아니라 퇴적물 오염의 추이를 계속 관찰할 필요가 있는 것으로 판단된다.

4. 결 론

인공호수인 시화호 주변 유역은 우리나라에서 가장 고도로 산업화가 진행되고 있는 지역 중 하나이며 현재 조력발전소 가동으로 인한 수질변화가 예상되고 있다. 본 연구에서는 2011~2012년 동안 총 14회에 걸쳐 시화호 내측과 외측의 수질관측결과를 바탕으로 투명도, 저층 용존산소 포화도, 용존무기인, 용존무기질소 및 클로로필-a 농도를 이용하여 개정된 수질평가지준(수질평가지수값, WQI)에 적용하여 시화호 주변해역의 시·공간적 수질변화 특성과 조력발전소 가동에 따른 수질개선 효과를 평가하였다. WQI는 시화호 내측의 산업단지 인근수역과 외측의 하수처리장 방류구 주변에서 상대적으로 높은 값을 보였고, 시화방조제와 외해역으로 갈수록 감소하는 수평분포 특성을 보였다. 이는 시화호 내·외측의 수질은 주로 시화호의 유역 내 산업단지, 도심 및 농촌지역에서 유입되는 비점오염물질과 하수처리장 방류수에 큰 영향을 받고 있는 것으로 판단된다. 시화호 내측의 수질평가지수는 2011년 53.0(IV 등급, 나쁨)에서 2012년 42.8(III 등급, 보통)로 감소하여 조력발전소 가동에 의한 해수유통량 증가는 저층 용존산소 농도의 증가로 이어져 전체적으로 시화호 수질을 개선시키는 것으로 나타났다. 외측에서 평균 WQI는 조력발전소 정상 가동 이후 약간 감소하여 우려되었던 내측 해수의 외측 방류에 의한 수질 오염은 미미한 것으로 나타났다. 그러나 강우가 집중되는 여름철에 수질평가지수가 급격히 증가하였고, 군집분석 결과를 통하여 시화호 상류지역은 조력발전소 가동을 통한 수질개선 효과가 미미한 것으로 나타나, 시화호 전체의 수질개선을 위해서는 유역하천 및 산업단지 내 우수토구를 통한 비점오염물질 관리 및 저감대책이 시급한 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 국토해양부 연구사업 “시화호 해양환경개선사업(PM56221, PG47821)”의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 시료 채취에 도움을 주신 조진행, 이상선, 이상근 선생님들께 감사드립니다. 논문의 질적 향상을 위하여 유익한 지적과 조언을 해주신 익명의 심사위원님들께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] EPA(Environmental Protection Agency), 2007, “National Estuary Program Coastal Condition Report”, Environmental Protection

- Agency. Office of Water, Office of Research and Development, Washington, DC, 445 p.
- [2] Kim, Y.S., Lee, Y.H. and Choi, H.G., 2012, "Water quality assessment at coastal area of the East Sea of Korea", J. Kor. Soc. Mar. Environ. & Safety, Vol.18, No.1, 15-24.
- [3] KORDI(Korea Ocean Research and Development Institute), 1999, "Report on study of environmental changes and establishment of conservation countermeasure for Lakes Shihwa", 363 p.
- [4] Lim, D., Choi, H.W., Kim, Y.O., Jung, H.S. and Kang, Y.S., 2011, "Concentration level and grading of water quality components (COD, DIN, DIP, Chlorophyll-a) in Korean coastal water, Vol.33, No.1, 13-20.
- [5] MTLM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs), 2009, "Project to improve the marine environmental of Lake Shihwa", 762 p.
- [6] MTLM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs), 2010, "Project to improve the marine environmental of Lake Shihwa", 850 p.
- [7] MTLM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs), 2011, "Project to improve the marine environmental of Lake Shihwa", 975 p.
- [8] MTLM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs), 2012, "Project to improve the marine environmental of Lake Shihwa", 863 p.
- [9] Park, J.K., Kim, E.S., Cho, S.R., Kim, K.T. and Park, Y.C., 2003, "Annual variation of water qualities in the Shihwa Lake", Ocean & Polar Res., Vol.25, No.4, 459-468.
- [10] Ra, K., Kim, K.T., Kim, J.K., Bang, J.H., Lee, J.M., Kim, S.K., Kim, E.S., Yoon, M.S. and Cho, S.R., 2011, "Study on the characteristics and non-point source pollution loads in stormwater runoff of Shihwa Lake", J. Kor., Soc., Mar., Environ. Engineering, Vol.14, No.1, 40-50.
- [11] Strickland, J.D.H. and Parsons, T.R.P., 1972, "A practical handbook of seawater analysis", Fisheries Research Board of Canada. 167 p.

2013년 2월 13일 원고접수

2013년 3월 15일(1차), 5월 7일(2차) 심사수정일자

2011년 5월 8일 게재확정일자