

## 조간대 복원이 수조류의 분포에 미치는 영향<sup>1a</sup>

박치영<sup>2,3</sup> · 신만석<sup>4</sup> · 김호준<sup>5</sup> · 백운기<sup>6</sup> · 이준우<sup>3\*</sup>

### Study on the Influence of Waterbirds Distribution According to the Restoration of Intertidal Zone<sup>1a</sup>

Chi-Young Park<sup>2,3</sup>, Man-Seok Shin<sup>4</sup>, Ho-Joon Kim<sup>5</sup>, Woon-Kee Paek<sup>6</sup>, Joon-Woo Lee<sup>3\*</sup>

#### 요 약

본 연구는 경기도 시화호를 대상으로 조간대 복원 전(2009~2011년)과 후(2012~2014년)의 조류군집 양상과 이용분포변화를 알아보고자 수행되었다. 조간대 수조류는 복원 후에 약 4만여 개체가 증가하였다. 대부분 수조류가 증가하였으며, 잠수성오리류는 감소하였다. 관찰된 각 수조류의 개체수 증감 변동 분석을 실시한 결과 도요·물떼새류가 복원 전과 비교하여 뚜렷한 개체수 증가를 보였다. 서식지 이용양상의 변화는 복원 후에 가장 넓어진 조간대 면적을 포함하고 있는 남측간척지 조간대와 내수면 조간대 지역으로서 이는 먹이원인 저서생태계의 변화와 연관된다. 복원된 시화호의 저서생태계는 기회종의 감소와 함께 오염에 민감한 평형종의 지속적인 증가로 안정화가 진행되었고 결과적으로 도요·물떼새류의 서식에 환경적 여건이 개선되었음을 판단할 수 있었다. 결과적으로 조간대의 복원은 수조류의 이용 분포 변화에도 단시간에 영향을 주었다. 복원 전과 비교하여 모든 수조류가 넓은 면적의 조간대에 고르게 분포하였으며, 특히 도요·물떼새류와 고니·기러기류의 서식분포에 큰 변화를 준 것으로 확인되었다. 본 연구결과는 조력발전에 의한 인위적인 조간대의 복원이 조류에 미치는 영향 연구로서 수행되었으며, 종다양성 측면에서 조간대의 중요성이 재확인 되었고 현재까지 긍정적인 변화를 보이고 있다. 향후 유사한 환경에서의 생물다양성 유지 및 증진을 위한 대안의 한 방법으로 방향성을 제시할 수 있을 것이다.

주요어: 생물다양성, 조력발전, 간척지

#### ABSTRACT

In this study, the bird fauna of Sihwa Lake in Gyeonggi Province were investigated from 2009 to 2014 to identify the effect of the restored intertidal zone on bird community. Based upon the analysis of the habitat status and distribution change of water birds in the intertidal zone, the following conclusions were obtained. The number of water bird individuals increased by approx. 40 thousand after the restoration. Most of water bird species increased, but diving ducks decreased. Analysis of the number of individuals of water birds before and

1 접수 2016년 9월 28일, 수정 (1차: 2016년 10월 25일), 게재확정 2016년 10월 26일

Received 28 September 2016; Revised (1st: 25 October 2016); Accepted 26 October 2016

2 한국환경생태연구원 KoEco, 62-12 Techno1-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34014, Korea

3 충남대학교 산림환경자원학과 Dept. of Forest & Environmental Resources, Chungnam Univ., 99 daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Korea

4 국립생태원 National Institute of Ecology, 1210 Geumgangro, Maseo-Myeon, Seocheon-gun 33657, Korea

5 한국수자원공사 K-Water 연구원 K-Water Institute 125 1689beon-gil, YuseongDaero, Yuseong-gu, Deajeon 34045, Korea

6 국립중앙과학관 National Science Museum, 481 Daedeokdaero, Yuseong-gu, Deajeon 34143, Korea

a 이 논문은 저자 박치영의 박사학위논문 일부를 발췌, 보완한 것임.

\* 교신저자 Corresponding author: Tel: +82-42-821-5749, Fax: +82-42-825-7850, E-mail: jwlee@cnu.ac.kr

after the intertidal zone restoration showed that there was a significant increase in the number of shorebird individuals. There is a habitat use pattern change in the southern tideland intertidal zone that includes the largest area of widened intertidal zone and the inland waters of the intertidal zone. This is related to the change of benthic ecosystem which is the food source of birds. The benthic ecosystem in restoring Sihwa Lake has been stabilized with a decrease in opportunistic species and consistent increase in equilibrium species that are sensitive to pollution. As a result, the environmental conditions for shorebirds have been improved. The restoration of intertidal zone affected the habitat use and distribution patterns of water birds in a short period of time. Compared to before restoration, all the water birds now use the wide area of the intertidal zone with no partiality and it is confirmed that the restoration greatly affected the distribution of shorebirds and swan & geese. This study was conducted to identify the effects of an artificial restoration of intertidal zone due to tidal power generation of bird species. In terms of maintaining and improving biodiversity, the intertidal zone restoration was recognized to be important and still shows positive results. This study is expected to provide a direction when an alternative is required to maintain and improve biodiversity in a similar situation in the future.

**KEY WORDS: BIODIVERSITY, TIDAL POWER GENERATION, RECLAIMED LAND**

## 서론

시화지구 간척사업은 국가의 대단위 간척종합개발사업의 일환으로 1970년대부터 거론되기 시작하여 1986년에 시행방안이 확정되었다. 경기도 시흥시, 안산시, 화성시로 둘러싸인 인공호수를 조성하기 위한 12.7km의 방조제는 1987년 6월에 착공하여 1994년 1월에 체절되었다(KWRC, 2005). 방조제 축조로 형성된 시화호의 면적은 56.5km<sup>2</sup>, 유역 면적은 476.5km<sup>2</sup> 이었다. 그러나 수질오염을 비롯한 생태계 변화 등 환경문제가 심각하게 대두되었고, 따라서 1997년부터는 배수갑문을 통해 상시 해수유통이 이루어지게 되었으며, 1999년에 공식적으로 담수호에서 해수호로 전환된다. 또한 배수갑문 운영만으로는 수환경 개선에 한계를 드러내자 해수유통량을 대폭 확대하여 극복하고자 조력발전소를 건설하기로 계획하고 2004년에 착공하여 2011년에 완공하기에 이른다(Lee, 2012). 배수갑문 운영을 통해 시화호 내수면을 -1.0m로 낮게 관리함에 따라 시화호 북측에 11.87km<sup>2</sup>, 남측에 97.09km<sup>2</sup>의 간척지가 드러났다. 북측간척지는 2002년부터 9.26km<sup>2</sup>의 면적을 산업단지인 멀티테크노벨리(MTV)의 건설과 남측간척지는 2007년부터 2022년까지 농지조성지역을 제외한 55.82km<sup>2</sup> 면적을 주거 및 관광레저단지인 송산그린시티의 개발계획이 공시되었다.

시화호가 조성된 이후 20여 년이 지났지만 시화지구 개발사업 중 1단계 사업과 조력발전소 건설 사업만 완료되었을 뿐 남측과 북측 간척지의 개발사업인 시화 MTV, 송산그

린시티, 간척농지 개발 사업은 아직 진행 중에 있다. 그럼에도 불구하고 시화호 수공간과 방조제 건설로 인해 형성된 간척지는 초지생태계로 천이되어 조류에게 중요한 서식처를 제공하고 있다. 조류에게 특히 수환경은 여러 가지 측면에서 그 중요한 생활공간을 제공한다. 갯벌습지, 호수, 저수지, 강은 겨울철새에게는 이듬해 번식을 위해 준비하는 월동지 역할을 하며, 통과조류에게는 먹이와 휴식을 제공하는 중간기착지이며, 텃새와 여름철새에게는 중요한 번식 장소를 제공한다(Yoo and Kwon, 2004). 간척호는 오리류에게 좋은 서식지를 제공하는 경우도 있지만 갯벌생물에 의존하는 섭금류의 서식에는 영향을 미친다(Lee, 1997). 수조류 중에 일부 종의 우점화가 진행되고 서식처의 다양성이 떨어지게 되어 조류의 종다양성이 낮아지기도 한다(KWRC, 2005). 2012년부터 본격적으로 조력발전소가 가동된 후 시화호는 개선된 수층환경과 규칙적인 조석환경으로 갯벌생태계의 안정화를 유도하고 있다(MOF, 2013). 간척으로 사라졌던 조간대가 조력발전소로 인해 다시 복원된 것은 국제적으로도 유례가 없는 독특한 사례이다(Kim and Koo, 2015). 조류의 기준에서 복원(restoration)은 둥지, 채식, 휴식을 위한 적절한 은신처가 필요하며, 먹이를 공급해 주는 것을 포함한다고 하였다(Ward *et al.*, 1995). 논란의 여지가 있을 수 있겠지만 서식처의 질이 저하된 간척지에서 현재의 서식처를 향상시키고 조류의 서식환경이 회복(reinstatement)된 개념에서 그 의미를 두고자 하였다.

따라서 본 연구는 우리나라 주요 조류서식지 중 한 곳인 시화호를 대상으로 조간대 복원에 따른 조류의 서식양상과

분포의 변화상을 알아보고자 하였으며, 향후 간척환경에서 조류 서식지의 효율적인 보전 방안과 생물다양성 유지 및 증진을 위한 대안 마련의 기초자료로서 제시하고자 한다.

## 연구방법

### 1. 조사지역

2012년부터 시화호 조력발전소(Tidal Power Plant, TPP)가 가동되면서 최고 -1.0m에서 최저 -4.5m 범위(평균해수면 기준)의 규칙적인 조석이 유지되었고, 시화호 내측에는 넓은 조간대가 새롭게 형성되었다(Kim and Koo, 2015). 조사지역 범위는 시화호 내측에 형성된 조간대를 포함하고 있는 6개 지역을 대상으로 하였으며, 경기도 화성시 송산면에 위치한 남측조간대와 시흥시와 안산시에 걸쳐 건설 중인 시화 MTV(Multi Techno Valley)의 북측 조간대를 포함한다(Table 1, Figure 1). 동쪽으로는 안산 갈대습지공원 앞 지역까지 연구지역으로 설정하였다.

Table 1. Classification of the survey points in the intertidal zone of Sihwa Lake

No.	Survey point
1	Reed Wetland Park Intertidal(P1)
2	Upstream Intertidal(P2)
3	South Reclaimed Intertidal(P3)
4	Sihwa Lake Inland water Intertidal(P4)
5	North Reclaimed Intertidal(P5)

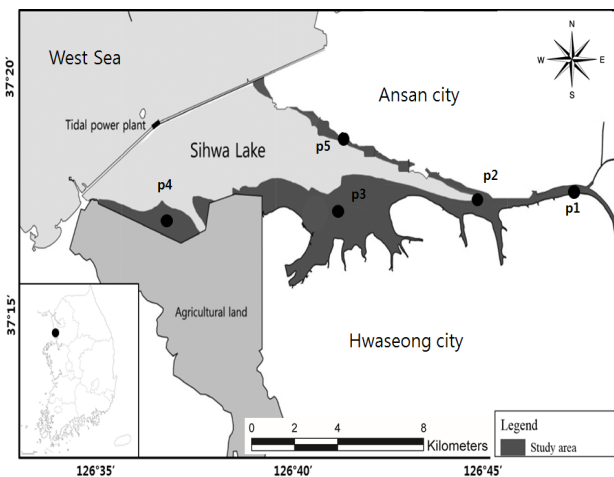


Figure 1. Range of survey area in the intertidal zone of Sihwa Lake

### 2. 조간대 면적 산출

시화호 조간대 면적자료는 MOF(2013)의 자료를 이용하였다. 조간대 면적은 원격탐사기법과 실고도 측량자료를 이용하여 작성된 수치표고모델(Digital Elevation Model, DEM)을 통해 산출되었다. 각 시기별 조간대 면적 분석을 위해 위성영상(Landsat)이 사용되었다. 인공위성 영상은 미국지질조사소(United States Geological Survey, USGS)로부터 획득하였다. 시화호방조제 완공 후, 배수갑문 운영시기인 2011년의 조간대 면적 산출에는 2010년 영상과 2011년 영상을 이용하였다. 조력발전소 가동 후인 2013년의 조간대 면적 산출에는 2012년 영상과 2013년 영상을 이용하였다. DEM은 Ryu(2001)에서 제안한 waterline법을 이용하여 작성되었다. Waterline 방법에 의해 생성되는 DEM의 정밀도는 waterline 추출의 정확도와 추출된 해안선에 얼마나 정밀한 절대고도 값을 대입할 수 있는지에 의해 결정된다(Choi *et al.*, 2010). 추출된 waterline에 실고도 측량값을 대입하여 좁은 조위가 측정된 조위관측소와 연구지역 간의 시·공간적 조위 오차값을 보완하고 DEM의 정밀도를 높일 수 있다(Koo and Kim, 2013). 실고도 측량은 국토지리정보원의 안양 458, 459 삼각점을 기준점으로 설정하여 실시하였다. 시화호 남측 및 북측조간대의 138개 정점에서 측량을 실시하였으며, 측정된 고도자료는 조위 자료와 동일하게 평균해수면(Mean Sea level) 기준 고도로 환산한 후 해안선에 대입하여 정밀하게 보정하였다. 보정을 마친 해안선들을 최소곡률법(minimum curvature)을 통해 내·외삽하여 DEM을 생성하였다. 최종적으로 조간대 면적의 산출을 위해 약최저저조위(Lowest Low Water, LLW)와 해안선에 해당하는 waterline을 시기별로 생성된 DEM을 이용하여 추출한 후, 이 두 조위 사이의 범위를 조간대 면적으로 산출

Table 2. Tidal level fluctuations of Sihwa Lake from 2010 to 2013

Date	Tidal height(m)	Date	Tidal height(m)
2010-01-03	-1.2	2011-06-15	-2.2
2010-02-04	-1.6	2012-04-30	-1.6
2010-02-20	-2.0	2012-06-01	-2.4
2010-04-09	-2.2	2012-06-17	-2.0
2010-04-25	-2.3	2012-10-07	-1.0
2010-10-18	-1.4	2013-04-17	-1.1
2011-01-06	-2.0	2013-05-11	-2.5
2011-03-11	-1.7	2013-06-04	-1.9
2011-04-12	-1.5	2013-07-02	-1.5
2011-05-14	-1.3		

하였다. 시화방조제 완공 후의 조간대 면적 분석은 시화호 내측 최저운영조위를 약최저저조위로 설정하여 수행하였다. 조력발전소 가동 후인 2013년에는 시화호 최저목표조위인 -4.5m까지의 범위를 조간대로 설정하여 면적이 산출되었다(Table 2).

### 3. 조류분류군의 구분

대상 수조류는 조간대를 주로 이용하는 가마우지류(Cormorants), 백로류(Herons), 저어새류(Spoonbills), 고니·기러기류(Swan&Geese), 수면성오리류(Dabbling ducks), 잠수성오리류(Diving ducks), 도요·물떼새류(Shore birds), 갈매기류(Gulls)의 8개 분류군으로 구분하였다.

### 4. 분석방법

#### 1) 조사결과 정리

조간대 복원 전(2009~2011년)과 후(2012~2014년)의 비교를 위해 조사 정점 1지점(Reed Wetland Park Intertidal), 2지점(Upstream Intertidal), 3지점(South Reclaimed Intertidal), 4지점(Sihwa Lake Inland water Intertidal), 5지점(North Reclaimed Intertidal)의 조간대 범위 지역을 대상지로 하였다.

#### 2) 통계 분석

조류분류군별 조간대 복원 전과 후의 개체수 차이에 대한 분석은 독립표본이 2개이며 정규성을 만족하지 않아 비모수 검정인 Mann-Whitney U test를 실시하였다.

### 5. 핵심서식지 분포 변화

조간대 복원 이전과 이후의 조류분포를 비교함으로써 핵심서식지 변화를 살펴보고자 하였다. 획득된 GPS좌표로 ArcGIS 9.x(ESRI Inc.) 및 ArcGIS용 Extension인 Hawth's Analysis Tool의 Animal Movement Tool을 이용하여 분석하였다. 최소블록다각형법(Minimum Convex Polygon Method : MCP) 100% 방법과 핵심서식지 면적을 알아보기로 커널 밀도추정법(Kernel Density Estimation: KDE) 90%, 70%, 50%를 이용하였다. 이때 KDE 분석을 위해 사용된 Smoothing Parameter Factor는 Animal Space Use 1.2(Idaho Univ.) 프로그램의 h\_reference 수치를 적용하여 분석하였다.

## 결과

### 1. 조력발전소 운영 전·후 조간대 면적 변화

시화호 담수화를 포기한 후부터 조력발전소 운영이 시작되기 전까지는 배수갑문이 운영되었으며, 해수유통이 이루어짐에 따라 불규칙하였으나 인공적인 해수면의 승강운동이 생겨났으며, 이로 인해 시화호 남단을 따라 높은 고도의 지역이 노출되며 조간대가 형성되었다(Kim and Koo, 2015). 2010년의 조간대는 당시의 조위운영범위인 최고 -1.0m, 최소 -2.0m의 사이에 위치한 지역이다. 해당지역을 면적화하여 산출된 조간대 면적은 약 5.6km<sup>2</sup>이었으며, 시화방조제 완공 전인 1991년의 약 5% 수준이었다. 조력발전소 가동 후에는 시화호 내측 기준조위가 -3.1m에서 -4.5m로 하강되었고, 1일 2회의 해수유통량의 확대를 통해 규칙적인 조석환경의 형성으로 조력발전소 가동 전에 비해 조간대 면적이 크게 증가되었다. 2013년의 조간대 면적은 총 20.3km<sup>2</sup>로 산출되었다(Table 3).

Table 3. Changes of the area of the intertidal zone in Sihwa Lake over time

Year	Area of intertidal(km <sup>2</sup> )	Issue
1991	115.2	Three years before the completion of construction for Sihwa dyke
2010	5.6	Period on operation of sluice gate
2013	20.3	After operation of Sihwa tidal power plant

### 2. 수조류 분류군별 군집 변화

#### 1) 조간대 복원 전과 후 개체수 변동

민물가마우지는 복원 전 평균 3,842개체(SD=2,815, range 878~7,626)에서 복원 후 평균 6,697개체(SD=904, range 5,914~7,964)로 74% 증가하였다. 백로류는 복원 전 평균 2,560개체(SD=340, range 2,297~3,041)에서 복원 후 평균 4,254개체(SD=270, range 4,013~4,630)로 66% 증가하였다. 저어새류는 복원 전 평균 34개체(SD=4, range 28~37)에서 복원 후 평균 84개체(SD=40, range 47~139)로 150% 증가하였다. 고니·기러기류는 복원 전 평균 3,044개체(SD=699, range 2,221~3,930)에서 복원 후 평균 3,652개체(SD=2,220, range 1,500~6,707)로 20% 증가하였다. 수면성오리류는 복원 전 평균 32,972개체(SD=5,827, range 24,873~38,341)에서 복원 후 평균 51,284개체(SD=6,157, range 45,670~59,856)로 56% 증가하였다. 잠수성오리류는 복원 전 평균 29,524개체(SD=23,889, range 6,805~19,230)에서 복원 후 평균 13,972개체(SD=9,694, range 6,092~27,628)로 47% 감소하였다. 도요·물떼새류는 복원 전 평균 6,249개체(SD=7,297, range 1,019~16,559)에서 복원 후 평균 11,244개체(SD=5,268,

range 5,903~18,412)로 80% 증가하였다. 갈매기류는 복원 전 평균 5,237개체(SD=375, range 4,970~5,767)에서 복원 후 평균 6,333개체(SD=606, range 5,632~7,111)로 21% 증가하였다. 잠수성오리류를 제외하고 복원 전과 비교하여 대부분의 수조류가 조간대를 이용하는 개체수가 증가한 것으

로 나타났다(Table 4). 각 분류군별 복원 전과 후의 조간대 이용 개체수의 증감에 대한 변동 분석을 실시한 결과에 따르면 도요·물떼새류가 유의한 차이를 나타냈다(Mann-Whitney U test.  $Z=-2.795$ ,  $p<0.01$ ). 갯벌 의존성이 높은 대표적인 조류인 도요·물떼새는 중간기착지로서 우리나라 서해안의 갯벌을 주로 이용한다. 과거 시화호는 도요·물떼새의 서식지로서 중요한 지역으로 평가되어 왔으나 방조제 건설로 인한 갯벌의 손실과 담수화로 개체수 감소가 불가피하였다. 그러나 복원 이후에 넓어진 조간대는 도요·물떼새류의 개체수 증가에 변화요인을 제공한 것으로 판단된다.

Table 4. Analysis of the number of individuals of water birds before and after the intertidal zone restoration

Birds group*	Mean(SD)		Z	p -value
	before	after		
Co	3,842 (2,815)	6,697 (904)	-1.091	0.275
He	2,560 (340)	4,254 (270)	-0.866	0.386
Sp	34 (4)	84 (40)	-1.549	0.121
Sg	3,044 (699)	3,652 (2,220)	-0.104	0.917
Da	32,972 (5,827)	51,284 (6,157)	-0.958	0.338
Di	29,524 (23,889)	13,972 (9,694)	-0.160	0.873
Sh	6,249 (7,291)	11,244 (5,268)	-2.795	0.005**
Gu	5,237 (375)	6,333 (606)	-0.577	0.564

\*Co: Cormorants(Great cormorant), He: Herons, Sp: Spoonbills, Sg: Swan&Geese, Da: Dabbling ducks, Di: Diving ducks, Sh: Shorebirds, Gu: Gulls, \*\* =  $p < 0.01$

## 2) 도요·물떼새의 조간대 분포변화

조간대 복원에 따른 서식지 분포양상의 변화에 대해 도요·물떼새를 대상으로 분석한 결과에 따르면 시화호를 주로 봄철에 도래하는 양상을 보였으며, 가을철은 일부 소규모 무리만 이용한 것으로 나타났다. 복원 후에 봄철은 대부분 증가한 경향을 보였으나 P5 지점(North Reclaimed Intertidal)은 복원 후에 감소한 것으로 나타났다. 복원 전에 도요·물떼새가 집중하여 분포하였으나 넓어진 면적의 조간대가 형성됨에 따라 분산된 것으로 판단된다. 가을철은 복원 후에 모든 지점이 증가한 것으로 나타났다(Table 5). 조간대의 복원 전과 후의 계절에 따른 개체수 변동에 대해 분석한 결과에 따르면 봄철은 유의한 차이를 보이지 않았으며, 가을철은 유의한 차이를 보였다(Mann-Whitney U test. 가을:  $Z=3.011$ ,  $p<0.01$ ). 각 지점별로 정확한 차이를 알아보기 위해 분석을 실시한 결과 P3지점(South Reclaimed Intertidal)과 P4지점(Sihwa Lake Inland water Intertidal)에서 유의한 차이가 있었다(Mann-Whitney U test. P3:  $Z=-2.267$ ,  $p<0.05$ , P4:  $Z=-2.861$ ,  $p<0.01$ ). 이러한 결과는 두 지점은 서로 공간적

Table 5. Analysis of the number of individuals of shorebirds in each study site in the intertidal zone during spring and autumn

Survey pointa)	Individuals(SD)							
	Spring				Autumn			
	Before	After	Z	p -value	Before	After	Z	p -value
P1	32 (7)	31 (6)	-0.410	0.682	5 (1)	12 (2)	-0.939	0.348
P2	104 (16)	146 (23)	-0.251	0.802	17 (4)	321 (62)	-0.550	0.583
P3	304 (30)	8,346 (2,199)	-0.918	0.359	3 (1)	78 (10)	-2.267	0.023*
P4	997 (173)	12,252 (3,063)	-0.180	0.857	78 (13)	835 (88)	-2.861	0.004**
P5	15,149 (3,922)	3,292 (822)	-1.390	0.165	18 (2)	66 (6)	-1.398	0.162

\* =  $p < 0.05$ , \*\* =  $p < 0.01$

으로 인접해 있고 복원된 조간대의 면적이 가장 넓어진 영향으로 도요·물떼새류의 서식에 적합한 환경으로 변화된 것으로 판단된다. 다만, 봄철은 도래개체수의 변동 편차로 인해 유의한 차이를 보이지 않은 것으로 보이거나 전반적으로 두 지점에서 모두 복원 후에 증가한 경향을 보였다.

### 3) 서식지 이용면적 분포변화

조간대 복원 전·후 전체 조류의 서식지 이용분포 면적은 최소불록다각형법(Minimum Convex Polygon Method : MCP)의 분석결과 조간대 개발 전에는 79.7km<sup>2</sup>이었으며, 복원 후에는 89.1km<sup>2</sup>로 조간대 복원 후에 넓은 이용분포 경향을 보였다. 커널밀도측정법 (Kernel Density Estimation : KDE) 50%의 이용분포를 보인 서식지의 면적은 복원 전에는 37.2km<sup>2</sup> 이었으며, 복원 후에는 43.1km<sup>2</sup>로 복원 후에 조간대를 이용하는 전체조류의 핵심서식지 면적도 증가한 경향을 보였다(Table 6, Figure 2). 각 분류군별로 가마우지류는 조간대 복원 전과 후의 MCP 분석 값은 76.6km<sup>2</sup>, 77.0km<sup>2</sup>이었

으며, KDE 50% 이용분포를 보인 핵심서식지의 면적은 복원 전 51.2km<sup>2</sup>, 복원 후 53.4km<sup>2</sup>로 유사한 경향을 보였다. 백로류의 조간대 복원 전과 후의 MCP 분석 값은 복원 전 74.6km<sup>2</sup>, 복원 후 86.7km<sup>2</sup>이었으며 KDE 50% 이용분포를 보인 서식지의 면적은 복원 전 44.8km<sup>2</sup>, 복원 후 49.5km<sup>2</sup>로 핵심서식지면적은 증가한 경향을 보였다. 저어새류의 조간대 복원 전과 후의 MCP 분석 값은 복원 전 25.1km<sup>2</sup>, 복원 후 73.2km<sup>2</sup>로 복원 후에 매우 높은 이용분포를 보였으며, KDE 50% 이용분포를 보인 서식지의 면적은 복원 전 40.2km<sup>2</sup>, 복원 후 47.2km<sup>2</sup>로 핵심서식지 면적은 증가한 경향을 보였다. 고니·기러기류의 조간대 복원 전과 후의 MCP 분석 값은 27.0km<sup>2</sup>, 48.8km<sup>2</sup>이었으며 KDE 50% 이용분포를 보인 서식지의 면적은 복원 전 30.4km<sup>2</sup>, 복원 후 52.5km<sup>2</sup>로 핵심서식지면적이 높게 증가한 경향을 보였다. 수면성오리류의 조간대 복원 전과 후의 MCP 분석 값은 복원 전 73.4km<sup>2</sup>, 복원 후 84.3km<sup>2</sup>이었으며 KDE 50% 이용분포를 보인 서식지의 면적은 복원 전 43.5km<sup>2</sup>, 복원 후 48.8km<sup>2</sup>로 핵심서식지면적은 증가한 경

Table 6. Comparison of changes in the extent of core habitat by bird group before and after the restoration in Sihwa Lake

Species	MCP(km <sup>2</sup> )		KDE(km <sup>2</sup> )					
	Before	After	Before			After		
			90%	70%	50%	90%	70%	50%
Cormorants	76.6	77.0	151.7	86.0	51.2	146.1	87.8	53.4
Hérons	74.6	86.7	131.6	73.9	44.8	138.6	82.6	49.5
Spoonbills	25.1	73.2	147.3	78.2	40.2	166.0	88.4	47.2
Swans&Geese	27.0	48.8	106.6	54.3	30.4	158.5	90.9	52.5
Dabbling ducks	73.4	84.3	130.6	72.5	43.5	137.7	80.6	48.8
Diving ducks	66.7	76.2	101.8	50.2	26.7	115.5	61.0	30.8
Shorebirds	56.7	58.2	125.8	65.5	34.9	132.5	75.3	43.6
Gulls	76.1	86.1	128.1	72.2	42.2	129.8	78.9	47.2
Total	79.7	89.1	117.7	63.5	37.2	121.7	72.1	43.1

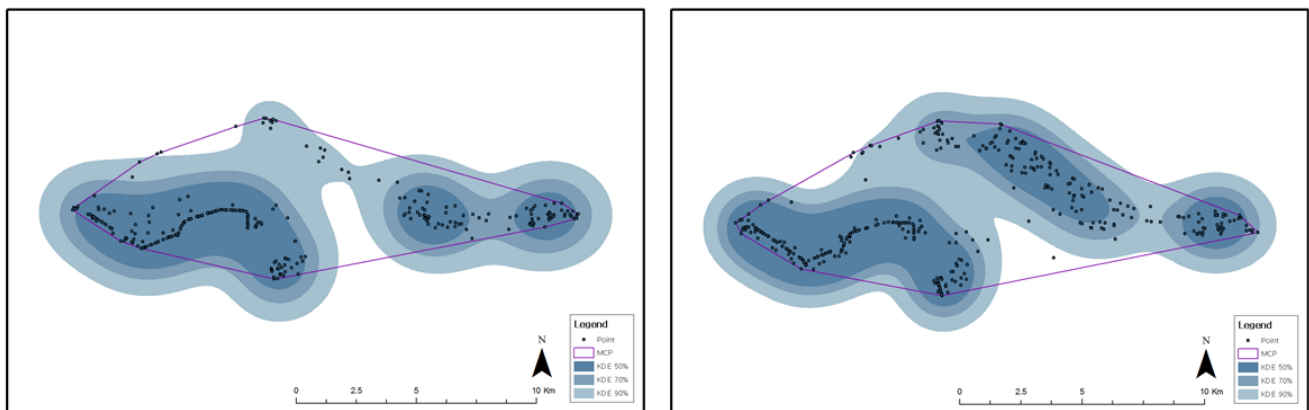


Figure 2. All birds home range(Dotted line is MCP and Contours represent 90, 70, 50% from outside line, respectively) of before(left) and after(right) restoration

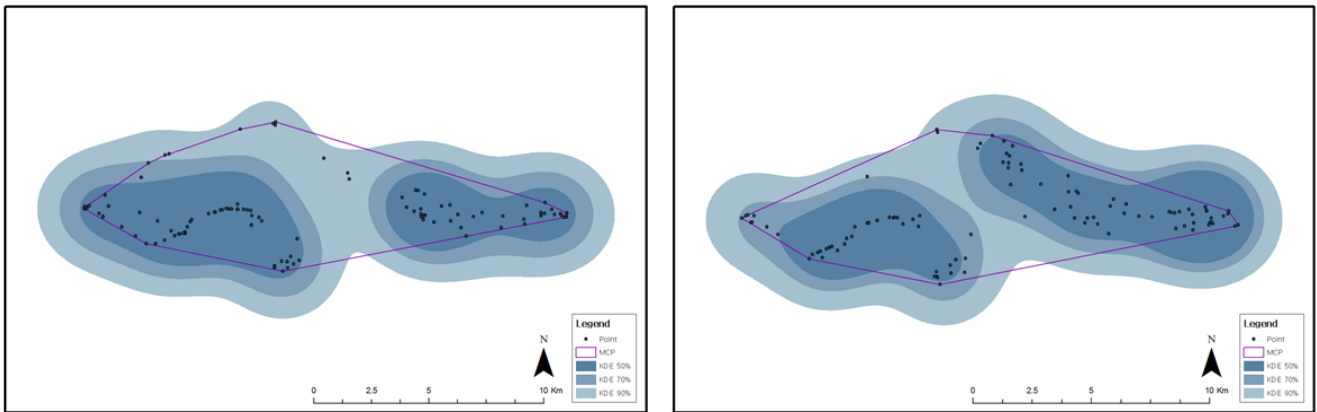


Figure 3. Cormorants home range(Dotted line is MCP and Contours represent 90, 70, 50% from outside line, respectively) of before(left) and after(right) restoration

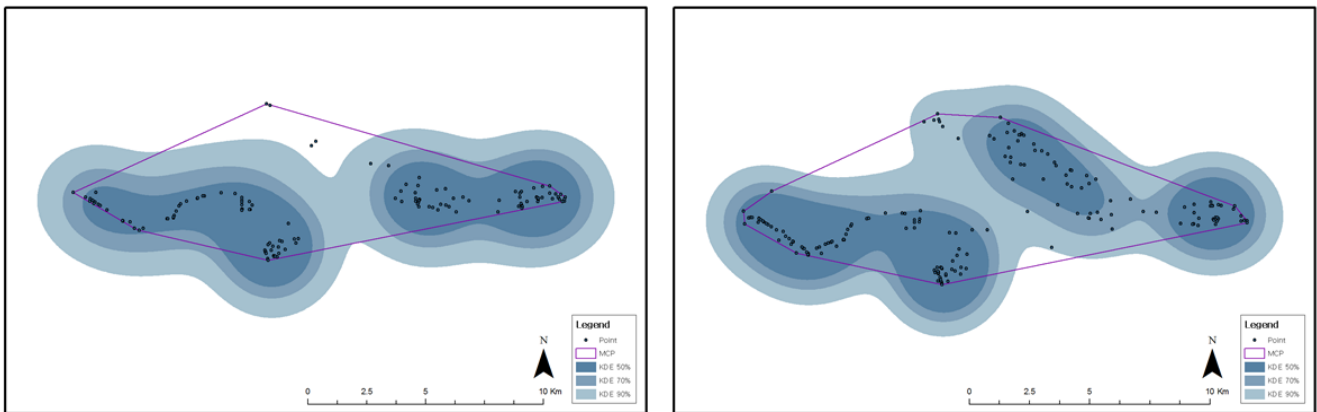


Figure 4. Herons home range(Dotted line is MCP and Contours represent 90, 70, 50% from outside line, respectively) of before(left) and after(right) restoration

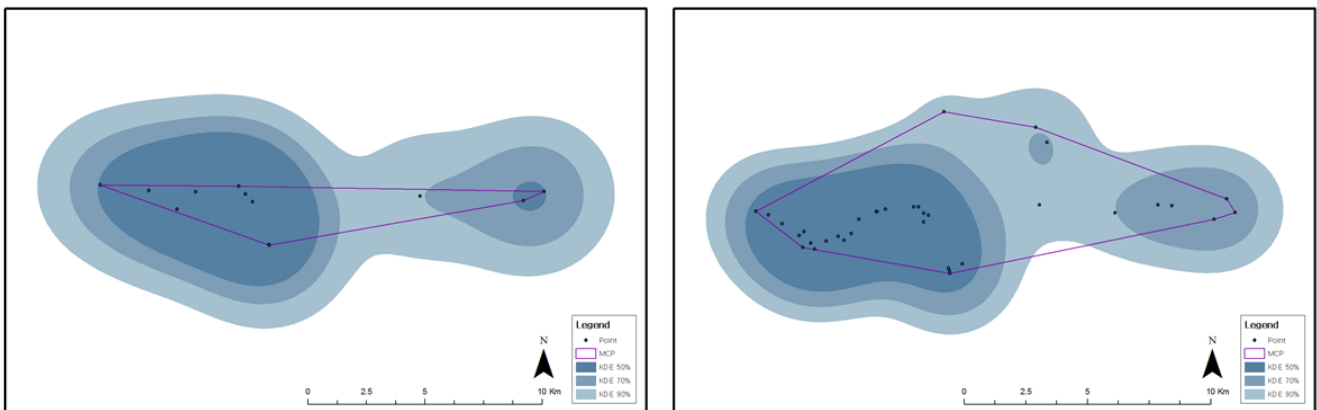


Figure 5. Spoonbills home range(Dotted line is MCP and Contours represent 90, 70, 50% from outside line, respectively) of before(left) and after(right) restoration



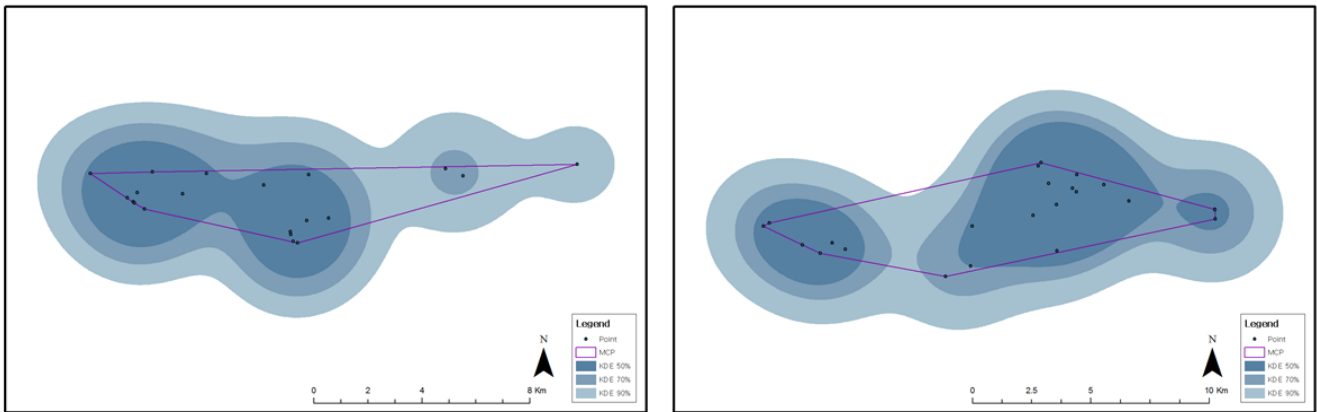


Figure 6. Swan&Geese home range(Dotted line is MCP and Contours represent 90, 70, 50% from outside line, respectively) of before(left) and after(right) restoration

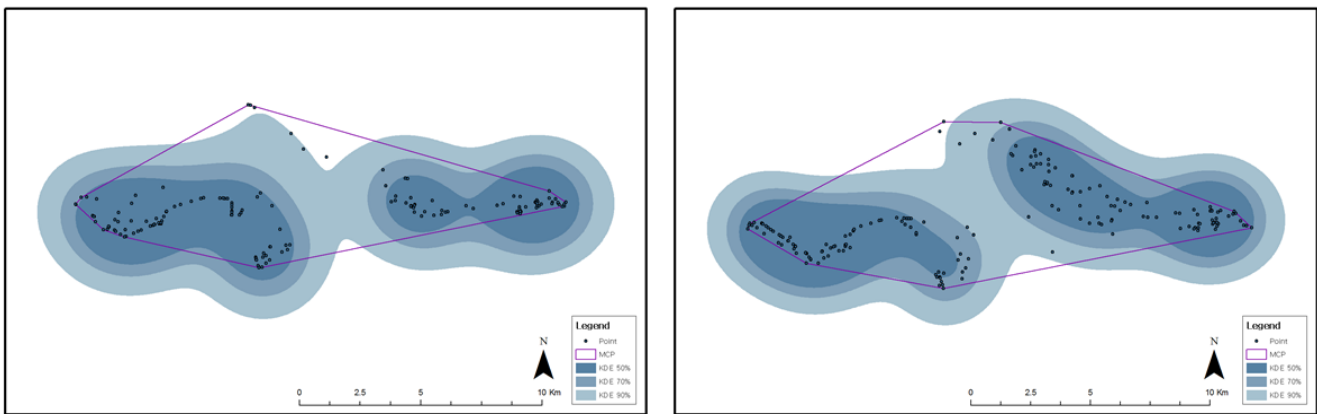


Figure 7. Dabbling ducks home range(Dotted line is MCP and Contours represent 90, 70, 50% from outside line, respectively) of before(left) and after(right) restoration

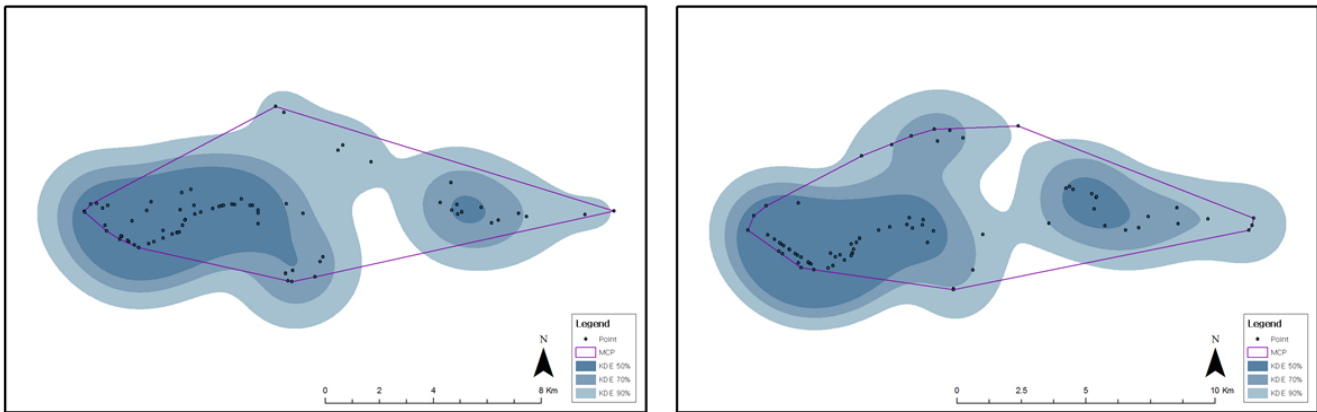


Figure 8. Diving ducks home range(Dotted line is MCP and Contours represent 90, 70, 50% from outside line, respectively) of before(left) and after(right) restoration



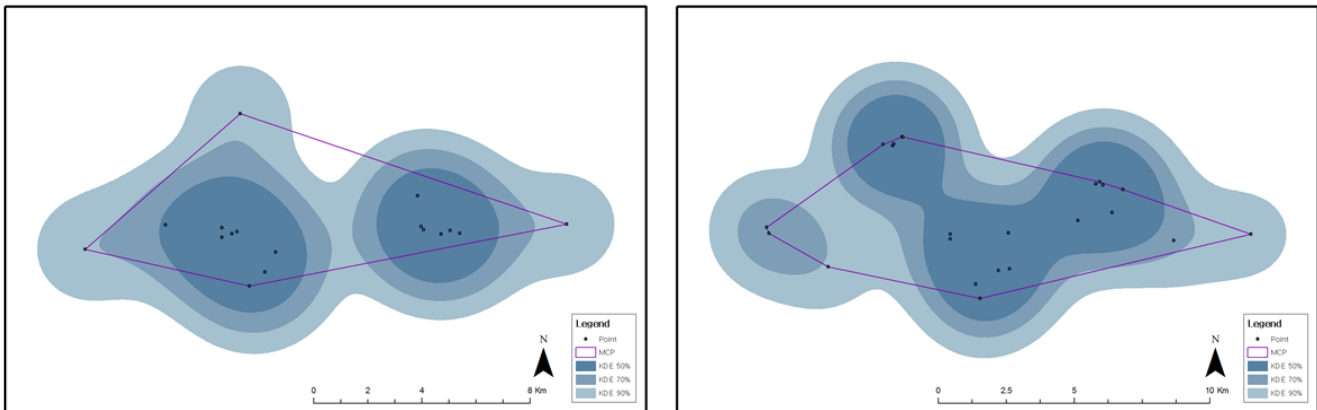


Figure 9. Shorebirds home range(Dotted line is MCP and Contours represent 90, 70, 50% from outside line, respectively) of before(left) and after(right) restoration

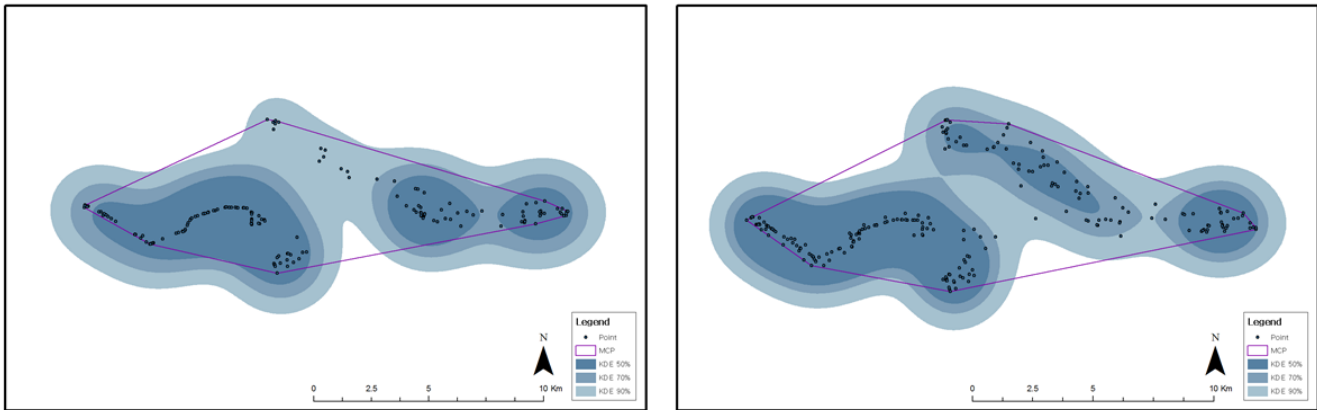


Figure 10. Gulls home range(Dotted line is MCP and Contours represent 90, 70, 50% from outside line, respectively) of before(left) and after(right) restoration

향을 보였다. 잠수성오리류의 조간대 복원 전과 후의 MCP 분석 값은 복원 전  $66.7\text{km}^2$ , 복원 후  $76.2\text{km}^2$ 이었으며 KDE 50% 이용분포를 보인 서식지의 면적은 복원 전  $26.7\text{km}^2$ , 복원 후  $30.8\text{km}^2$ 로 핵심서식지면적 모두 증가한 경향을 보였다. 도요·물떼새류의 조간대 복원 전과 후의 MCP 분석 값은 복원 전  $56.7\text{km}^2$ , 복원 후  $58.2\text{km}^2$ 로 유사한 경향을 보였으나, KDE 50% 이용분포를 보인 서식지의 면적은 복원 전  $34.9\text{km}^2$ , 복원 후  $43.6\text{km}^2$ 로 핵심서식지 면적은 조간대 복원 후에 증가한 경향을 보였다. 갈매기류의 조간대 복원 전과 후의 MCP 분석 값은  $76.1\text{km}^2$ ,  $86.1\text{km}^2$ 이었으며 KDE 50% 이용분포를 보인 서식지의 면적은 복원 전  $42.2\text{km}^2$ , 복원 후  $47.2\text{km}^2$ 로 핵심서식지면적은 증가한 경향을 보였다(Table 6, Figure 3~10).

## 고찰

생태계내의 환경과 생물 군집은 지속적인 상호작용을 통해서 서로 유기적인 관계를 통해 유지되며(Rhim and Lee, 2001), 생태계의 변화는 내부에 서식하고 있는 생물 군집의 변화로 쉽게 예측이 가능하다(Krebs, 1994). 본 연구결과 시화호에서 조간대 복원 전과 비교하여 복원 후에 관찰된 조류는 약 4만여 개체가 증가한 것으로 나타났다. 대부분 분류군의 개체수가 모두 증가하였으며, 감소한 분류군은 잠수성오리류이었다. 특히, 흰죽지 *Aythya ferina*는 개체수가 91% 이상 감소한 것으로 나타났다. 복원 전에는 시화호 내측의 개방수역을 주로 이용하였으나 복원 후에는 넓어진 범위의 조간대가 형성됨에 따라 시화호 내측의 수심이 깊은 곳을 일부 이용하거나 일정 수심이 지속적으로 유지되고 있는 방수제를 주로 이용하는 양상으로 변화한 것으로 보인다

다. 잠수성오리류의 취식은 대부분 1~3m에서 행해진다고 하였으며(Hong, 2012), 본 연구결과에서도 조간대 레벨 - 1.0~2.0m를 유지하였던 복원 전의 수심환경이 보다 서식에 적합한 환경을 제공한 것으로 사료된다. 반면, 검은머리 흰죽지 *Aythya marila*와 흰뺨오리 *Bucephala clangula*는 오히려 증가한 결과를 보였으며, 같은 기간의 시화호 전체 지역의 조사에서는 복원 전에 개체수가 더 많았던 것과 상반된 결과를 보였다. 검은머리흰죽지는 2~4m의 수심을 선호하지만(Johnsgard, 1978) 흰죽지에 비해 비교적 수심이 얇은 수역에서도 잘 적응한다고 하였으며(Hong, 2012), 시화호의 수공간과 조간대의 경계지역인 조간대 레벨 - 1.0~4.5m의 넓은 범위의 지역을 취식지 및 휴식처로 이용하여 일부 잠수성오리류에게도 적합한 서식환경이 제공된 것으로 판단된다. 유사사례로 인위적으로 식생군락을 제거하여 면적이 증가한 갯벌은 도요·물떼새류(shorebird)와 수금류(waterfowl)의 개체수가 크게 증가하였으며, 이는 취식지의 감소와 먹이원인 저서생물의 밀도 감소는 수조류의 군집과 연관되어 있음을 제시하여(Millard and Evans, 1984) 본 연구결과와 근거를 뒷받침 해주고 있다.

각 수조류의 조간대의 개체수 증감에 대한 변동 분석을 실시한 결과에 따르면 도요·물떼새류가 유의한 차이를 나타냈다. 우리나라를 봄철과 가을철에 중간기착지로 이용하는 통과철새(Passage migrants)로서 서해안의 갯벌에 의존성이 높은 종이다(Newman and Lindsey, 2011). 대륙 간 장거리를 이동하는 도요·물떼새류에게 중간기착지는 환경변이성이 크다고 하였다(Skagen and Knopf, 1993). 과거 시화호는 도요·물떼새의 주요 기착지로서 중요한 지역으로 평가되었으나 방조제 건설로 인한 갯벌의 손실과 담수화로 개체수 감소를 유발하였으며(KWRC, 2005), 시화호 뿐만 아니라 서해안의 주요 도래지역은 이미 많은 간척사업으로 소실되었다(Lee, 2000). 조간대는 다양한 저서동물의 높은 밀도로 분포하고 있으며 이는 도요·물떼새의 분포에도 중요한 영향을 미치며(Lee, 2000), 뚜렷한 개체수의 증가는 먹이원인 저서생태계와 연관될 수 있다고 판단된다. 도요·물떼새의 조간대 서식지 이용양상 변화에 대해 분석한 결과 계절별로는 봄철에 대부분 도래하는 경향을 보였으며 가을철은 상대적으로 소규모 무리만 도래하였다. 각 지점별 복원 전과 후의 변동 양상은 남측간척지 조간대와 시화호내수면 조간대에서 뚜렷한 도래개체수의 증가경향을 보였다. 이는 두 지점이 복원 이후에 가장 넓어진 조간대면적이 형성된 지역으로서 서식환경의 여건이 개선된 이유로 판단된다. 복원된 시화호의 조간대는 저서생물의 종수 및 생물량은 증가하기 시작하였으며 반면, 개체수는 크게 감소하는 경향을 보였다. 이는 기회종의 감소와 함께 평형종이 증가하였음을 의미하며, 오염에 민감한 평형종의 증가는 조간대의 저서생

태계의 안정화가 진행되었음을 언급하였다(MOF, 2013). 복원 전은 일부 존재하던 조간대와 수심이 얇은 수변을 주로 이용하였으나 복원 후에는 조석 차이에 의한 넓어진 면적의 조간대와 시화호 외측 갯벌을 오가며 고루 취식지로 이용하는데 적합했던 것으로 사료된다. 그러나 아직까지 소규모 무리만 도래하였으며, 향후 도래 패턴 분석을 통한 세심한 관리가 필요할 것으로 보인다(Nam, 2016).

자연습지는 다양한 야생동물에게 먹이제공, 번식장소, 피난처로서 이용된다(Mitsch and Gosselink, 2000; Hattori and Mae, 2001). 그러나 인간의 활동에 의해 그 면적은 전 세계적으로 급격히 감소하였다(Tiner, 1984; Finlayson *et al.*, 1992; Maitland and Morgan, 1997; Fujioka *et al.*, 2001). 우리나라에서는 서해안에 집중된 간척으로 인한 자연습지인 갯벌이 지속적으로 손실되어 왔다. 최근에는 세계 각국의 생물다양성 증진과 생태계의 관리에 대한 관심도가 커짐에 따라 습지의 보전과 복원, 향상과 창출, 대체습지 조성 등의 생태계 복원의 다양한 형태가 나타나고 있다(Lee, 2011). 서식지의 감소는 곧 생물의 절멸과 직결되므로 이러한 관계연구는 필수로 보여지며 특히, 조류는 환경변화에 민감하여 환경구성에 따라 군집의 유입과 유출을 단시간에 확인할 수 있다. 시화호의 조간대 면적의 증가는 조류의 서식지 이용양상 변화에 비교적 단시간에 영향을 미친 것으로 나타났다. 서식지 이용면적과 분포에 대해 분석한 결과에 따르면 모든 수조류가 복원된 이후에 넓은 면적을 이용하는 경향을 보였으며 특히, 조간대환경을 선호하는 도요·물떼새류와 고니·기러기류가 서식지 이용에 큰 변화를 보였다. 이러한 결과로 조간대는 수조류의 서식지로 그 중요함이 재확인 되었으며, 현재까지 긍정적인 변화를 보인 것으로 설명할 수 있을 것이다.

## REFERENCES

- Choi, J. K., Oh, H. J., Koo, B. J., Ryu, J. H. and Lee, S.(2010) Crustacean habitat potential mapping in a tidal flat using remote sensing and GIS. *Ecol. Model* 222:1522-1533.
- Finlayson, C. M., N. C. Davidson, A. G. Spiers and N. J. Stevenson(1992) Global wetland inventory-current status and future priorities. *Marine and Freshwater* 50:717-727.
- Fujioka, M., J. W. Armacost, H. Yoshida and T. Maeda(2001) Value of fallow farmlands as summer habitats for waterbirds in a Japanese rural area. *Ecological Research* 16:555-567.
- Hattori, A. and S. Mae(2001) Habitat use and diversity of waterbirds in a coastal lagoon around Lake Biwa. *Japan Ecological* 16: 543-553.
- Hong, S.B.(2012) Change of visitation Aspect of Pochards (*Aythya spp.*) in the Long Period at Nakdong Estuary, Busan, Korea.

- The Korean Journal of Ornithology 19(3):163-172. (in Korean with English abstract)
- Johnsgard, P. A.(1978) Ducks, Geese, and Swans of the World. University of Nebraska Press, Lincoln and London.
- Kim, M.K and Koo, B.J(2015) The Intertidal Area in Lake Sihwa After Operation of the Tidal Power Plant. Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy 18(4):310-316. (in Korean with English abstract)
- Koo, B.J and Kim, M.K(2013) Analysis on Topography and Exposure Duration of Siheung Tidal Flat Using Remote Sensing Techniques. Ocean and Polar Research 35(4):291-298.
- Korea Water Resource Corporation(2005) Study about establishment method of ecological network of the Sihwa Lake. Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation. 264pp. (in Korean)
- Krebs, C. J.(1994) Ecology: the experimental analysis of distribution and abundance (4th ed.). Harper Collins College Publishers. New York.
- Lee, D.P.(1997) A Study on the Community of Wintering Waterbirds in Yongam Lake. Bulletin of Korea Institute of Ornithology 6(1):55-62. (in Korean with English abstract)
- Lee, H.K.(2012) Shihwa Regional Reclamation Development Project and the Changes in the Environmental Management Policy. Environmental Law and Policy 9:153-173. (in Korean with English abstract)
- Lee, K.S.(2000) Current Status and Population Fluctuations of Waterbirds on the West Coast of Korea. Ph. D. Dissertation, Univ. of Kyunghee, Seoul, 176pp.
- Lee, S.W.(2000) Feeding ecology of migratory waders in relation to the preys on the southern tidal flat of Kanghwa Island in the west coast of Korea. Ph. D. Dissertation, Univ. of Kyunghee, Seoul, 191pp.
- Lee, W.H.(2011) The Effect of Bird Habitat Rehabilitation at Eulsukdo, Nakdong River Estuary. Ph. D. Dissertation, Univ. of Dong-A, Busan, 79pp.
- Maitland, P. S. and N. C. Morgan(1997) Conservation management of freshwater habitats. Lakes, Rivers and Wetlands. Chapman & Hall, London.
- Millard, A. V. and P. R. Evans(1984) Colonisation of mudflats by *Spartina anglica*: Some effects on invertebrate and shorebirds populations at Lindisfarne. *Spartina anglica* in Great Britain. Focus on nature conservation 5:41-48.
- Ministry of Oceans and Fisheries(2013) Annual report of project to improve the marine environments of the Shihwa Lake, Korea Institute of Ocean Science & Technology (KIOST), pp. 145-189. (in Korean)
- Mitsch, W. J. and J. G. Gosselink(2000) Wetlands, third ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, USA. pp.571-609
- Nam, H.K.(2016) Management and conservation of rice fields for waterbirds. Ph. D. Dissertation, Univ. of Kyunghee, Seoul, 137pp.
- Newman, M. I. and K. E. Lindsey, A(2011) A ten-year study of shorebirds at the morpeth wastewater treatment work near Maitland in New South Wales. Stilt 60: 37-45.
- Rhim, S.J and Lee, W.S(2001) Changes in Breeding Bird Community Caused by Thinning in Deciduous Forest. Journal of Korean Forest Society 90(1):36-42. (in Korean with English abstract)
- Ryu, J.H.(2001) Quantitative estimation of geomorphologic change and analysis of sediment characterization in Gomso Bay tidal flat by remote sensing. Ph. D. Dissertation, Univ. of Yonsei, Seoul, 127pp.
- Skagen, S. K. and F. L. Knopf(1993) Toward conservation of mid-continental shorebirds migrations. Conservation Biology. 7:533-541.
- Tiner, R. W. Jr.(1984) Wetlands of the United States: Current Status and Recent Trends. US Fish & Wildlife Service, Washington D. C.
- Ward, D. E., G. J. Hirons and M. J. Self(1995) "Planning for the restoration of peat wetlands for birds." Restoration of Temperate Wetlands. John Wiley and Sons Ltd., New York pp.222
- Yoo, J.C. and Kwon, Y.S(2004) A Study on the distribution and major habitat of birds in Asanman Bay, South Korea. The Korean Journal of Ornithology 9(1):1-18 (in Korean with English abstract)