

## 동해안 석호의 지형학적인 특성에 따른 어류군집분포와 갈대의 안정동위원소비

이재용 · 박승철<sup>2</sup> · 김민섭<sup>1</sup> · 최재석<sup>2</sup> · 이광열<sup>3</sup> · 신경훈<sup>4,\*</sup>

(주)자연과사람 환경기술연구소, <sup>1</sup>국립환경과학연구원 환경측정분석센터, <sup>2</sup>강원대학교 환경연구소, <sup>3</sup>강원대학교 생명과학과, <sup>4</sup>한양대학교 해양융합과학과

**Distribution of Fish Assemblage and Stable Isotope Composition of Reeds according to Geomorphic Characteristics of Lagoons along the East Sea. Lee, Jaeyong, Seungchul Park<sup>2</sup>, Minseob Kim<sup>1</sup>, Jae-Seok Choi<sup>2</sup>, Kwangyeol Lee<sup>3</sup> and Kyunghoon Shin<sup>4,\*</sup> (Research Institute of Nature and Human, Wonju 200-844, Korea; <sup>1</sup>Fundamental Environment Research Department Environmental Measurement and Analysis Center, National Institute of Environmental Research, Ministry of Environment; <sup>2</sup>Environmental Research Institute at Kangwon National University; <sup>3</sup>Department of Biological Science, Kangwon National University; <sup>4</sup>Department of Marine Sciences and Convergent Technology, Hanyang University, Ansan 426-791, Korea)**

**Abstract** The purpose of study is to identify the relationship between stable isotope composition of reed stems in coastal and understand the structure of the fish community in 10 lagoons along the East Sea. The fish species composition (particularly, anadromous fish species) and relative abundance of trophic guilds was influenced by difference of geomorphic characteristics among lagoons. Reed stems  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  values ranged from  $-28.40 \pm 0.11\%$  to  $-26.87 \pm 0.25\%$  and  $-1.09 \pm 1.45\%$  to  $12.08 \pm 0.53\%$ , respectively. The differences in reed stem  $\delta^{15}\text{N}$  values might be associated with anthropogenic landuse and the geomorphic characteristics among lagoons. These results provide useful information to improve the conservation of fish habitats (biodiversity), preserve lagoon habitats and contribute to watershed management effect against anthropogenic pollution from watershed in these lagoon ecosystems.

**Key words:** lagoon, stable isotope composition, anadromous fish, anthropogenic landuse, geomorphic characteristics

### 서 론

석호는 하구의 지형적인 변화(사구의 형성)에 의해 형성된 지형으로, 해수와 담수의 빈번한 혼합이 이루어

지는 수생태계이다. 석호생태계에서는 자연적인 갯터짐에 따른 염분구배의 변동에 의존하여 수생생물이 분포한다. 지구생화학적인 물질순환의 측면에서 석호는 육상에서 기원하는 영양염 및 유기물을 해양으로 전달하는 매개 통로일 뿐만 아니라 회유성 수생생물의 이동통로 또는 서식지로서도 중요한 생물지리학적인 입지조건을 가지는 곳이다(Pombo *et al.*, 2005; Choi *et al.*, 2007a). Rueda and Defeo (2003)는 회유성 어류를 대상으로 하는 연구를 통해 석호생태계가 담수생태계와 해수생태계

Manuscript received 1 September 2014, revised 19 January 2015, revision accepted 27 March 2015  
\* Corresponding author: Tel: +82-31-400-5536, Fax: +82-31-416-6173, E-mail: shinkh@hanyang.ac.kr

사이에서 생물이 이동, 번식 그리고 성장을 도와주는 인큐베이터로서 중요한 완충지대로서의 역할을 강조한 바가 있다(Borderelle *et al.*, 2009; Franco *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2013a).

갈대는 C3식물이고 하나의 군락을 형성하는 벼과식물로서 육상에서 하천의 하구에 이르기까지 광역에 걸쳐 분포하고, 넓은 염분도 범위에 적응하여 성장하는 광염종이다(Min, 2011). 갈대가 분포하는 장소에서는 이들의 빠른 성장과 높은 생산성 때문에, 일반적으로 식생의 종 다양성은 낮은 것이 특징이다(Orth and Moore, 1983; Meyerson *et al.*, 2000; Jackson, 2001). 그럼에도 불구하고, 갈대군락은 육상동물의 은신처 및 철새를 포함한 다양한 조류의 경유지 및 서식처로써 이용되고 있다(Park and Oh, 2012). 또한 석호 주변에 발달한 갈대군락은, 특히 문순강우 시에, 석호유역 및 유입하천으로부터 유입되는 유기물 및 영양염의 증감에 대한 완충지대로서의 생태적 지위를 가진다.

안정동위원소분석은 석호의 지형적인 변화에 대한 특성과 유역의 인위적인 오염원의 영향을 추정하고 수생생물의 에너지의 기원을 예측하는 데 유용한 수단이 되고 있다(Odiete *et al.*, 2003; Lee *et al.*, 2013b). 탄소안정동위원소비( $\delta^{13}\text{C}$ )는 담수 지역과 해수의 영향이 큰 해안 사이에서 서식하는 생물의 종적인 서식 분포 특성을 파악하는 수단으로써도 이용되곤 하였다. 일반적으로 C3광합성을 하는 식물로서 육상식물의  $\delta^{13}\text{C}$  ( $\approx -28\%$ )는 해양의 식물플랑크톤 ( $\approx -21\%$ )에 비해 상당히 가벼운 값을 보인다(Smith and Epstein, 1971; Kuramoto and Minagawa, 2001; Barile, 2004; Hoffman and Bronk, 2006). 또한 육상에서 기원하는 유기물의  $\delta^{13}\text{C}$ 값은 담수에서 해수로 이행하면서 무거워지는 양상을 보인다(Fry and Sherr, 1984; Yu *et al.*, 2010). 이와 같이 지리적인 분포 차이에 따른 유기물 사이의  $\delta^{13}\text{C}$ 값의 커다란 차이는 무기환경의 특성 및 생물 상호작용을 이해하는데 효과적으로 이용될 수가 있다(Li *et al.*, 2011).

질소안정동위원소분석 또한 수환경 및 유역환경에 대한 인위적인 교란 또는 오염원에 노출되는 정도를 파악하는데 이용되기도 한다. Wada *et al.* (1984)는 논경지벼의  $\delta^{15}\text{N}$ 는 논에 시비한 비료의 기원에 따라  $\delta^{15}\text{N}$ 의 차이가 발생함을 보인 바가 있다. Anderson and Cabana (2006)는 상위소비자인 어류의  $\delta^{15}\text{N}$ 의 변동을 통해 유역으로부터 유래하는 오염원 기여의 정도를 제시하였는데, 유역에 분포하는 가축 및 하수에서 기원하는 질소원의 유입이 상위영양단계에까지 영향을 미칠 수 있음을 제시하기도 하였다.

한편, 국내에서는 석호생태계를 대상으로 한 연구의 대부분이 담수의 수질환경 기준을 적용시켜 수질환경개선에 대해 초점을 두고 있기 때문에, 지구생화학적인 물질순환에서 중요한 입지를 가지는 석호생태계에 대한 인식이 다소 왜곡되어 있는 상황이다. 이는 국내에서 유일한 자연호수인 석호가 동해안에 인접하여 다수 분포하고 있음에도 불구하고, 석호생태계의 물질순환 및 생물군집을 이해하기 위한 연구는 거의 이루어지지 않고 있기 때문이다(Choi *et al.*, 2007a; Park and Kwon, 2012).

석호생태계에서 어류군집은 물리적인 환경변화(갯터짐)에 의존하여 어중에 따른 서식 및 분포가 제한되는데, 이는 일차적으로 담수와 해수의 혼합에 따른 염분구배의 차이에 의한 영향이 크다. 따라서 내륙담수생태계의 어류군집과 달리 석호생태계의 어류군집은 서식지의 물리적인 환경 및 수질환경의 변화에 상당히 민감하게 반응하는 생물분류군에 속한다.

갈대군락 역시 석호의 지형적인 특성뿐만 아니라 유역환경을 이해하는 데도 중요한 생물분류군이라 할 수 있다. 따라서 갈대는 석호의 수질환경 변화에 대한 정보뿐만 아니라 유역의 토지이용에 따른 영향을 반영할 수 있는 생물지표로서도 생태학적인 지위의 역할이 크다(Human, 2009). Fukuhara *et al.* (2007)은 갈대군락이 유역으로부터의 오염원에 대한 수질정화에 탁월한 역할을 하기 때문에 석호의 범람원에 분포하는 갈대군락의 면적크기는 석호수질과 직접적인 관련성이 있음을 보인 바가 있다.

최근까지 석호생태계의 생지화학적순환을 파악하고자 보고된 연구들 중 안정동위원소분석은 제한적으로 이루어져 왔다. 일찍이 Nakai and Hong (1982)이 영광호 퇴적물의 탄소안정동위원소를 분석하여 고기후에 대한 변동을 보고한 바가 있다. Choi *et al.* (2007b)은 토지 이용에 따른 지하수의  $\delta^{15}\text{N}$ 의 차이를 비교한 바가 있다. 그리고 Lee *et al.* (2013b)은 동해안 3개의 석호(영랑호, 매호, 화진포호)를 대상으로 빙어의  $\delta^{13}\text{C}$ 와  $\delta^{15}\text{N}$ 가 유역환경특성 및 생물의 서식환경을 유추하는 유용한 수단이 될 수 있음을 제안한 바가 있다.

본 연구에서는 지리적으로 동해안을 따라 분포하는 각각의 석호에 분포하는 어류군집의 특성을 파악하고자 하였으며, 갈대의 탄소·질소안정동위원소분석을 이용하여 석호의 지형적인 특성 및 유역환경특성을 파악하고자 하였다. 따라서 본 연구는 석호의 환경을 이해하고 나아가 석호보존방안을 제시하기 위한 기초자료로서 활용에 기여할 수 있을 것이라 본다.

## 재료 및 방법

### 1. 조사지점 및 조사시기

국내 동해안에 분포하는 석호는 18곳이 알려져 있다 (Fig. 1). 조사한 석호는 해수의 직접적인 영향의 정도에 따라 크게 3그룹으로 구분할 수 있다. 영랑호(YR), 청초호(CC), 화진포호(HJ) 그리고 경포호(GP)는 수시로 해수의 유입이 있고, 천진호(CJ)와 봉포호(BP)는 해수와 단절 또는 유입이 어려운 지형적인 특성을 가지며, 나머지 송지호(SJ), 광포호(KW), 매호(MA), 향호(HY)는 인위적인 구조물이 설치되어 있거나 문순강우 이후 사구의 갯터짐에 의한 일시적인 해수유입의 영향을 받고 있다(Fig. 1).

어류 조사기간은 2007년 5월부터 2013년 7월까지로 3~7회에 걸친 조사결과를 제시하였다. 어류의 식성에 대한 구분은 도감(Kim, 1997)에 제시된 내용에 의거하였다. 갈대시료는 수위가 낮아진 4월에 호안에 인접하여 수위의 변동에 따라 침수되는 지점에서 토양에서 높이 30 cm의 줄기부위를 채취하여 탄소·질소안정동위원소분석에 이용하였다.

### 2. 조사방법

#### 1) 어류의 채집 및 개체수의 표준화

어류채집은 호내의 지점에서 삼각망(5×5 mm)과 망목의 크기가 서로 다른 삼중자망(50×50 mm, 180×180 mm; 15×15 mm, 140×140 mm)을 사용하여 수중에 12시간 동안 정지한 후 어획물을 수거하였다. 또한 호내로 유입되는 하천 지점과 해안과 면하고 있는 유출수역에서는 각각 족대(4×4 mm: 40분)와 투망(7×7 mm: 14회)을 사용하여 정량채집 하였다. 채집된 어류는 현장에서 분류 및 동정하여 전장과 습중량을 측정된 다음 개체수를 확인하였으며, 동정이 어려운 개체 또는 표본이 필요한 경우에 한하여 10% formalin 용액에 고정 후 실험실로 운반하였다.

어류의 동정 및 생태형 구분에는 국내에서 발표된 검색표와 도감(Kim, 1997; Myung, 2002; Choi *et al.*, 2002; Kim *et al.*, 2005)을 이용하였으며 어류 목록의 배열은 Nelson(2006)의 분류체계를 참고하여 작성하였다.

채집된 어류군집의 개체수에 대하여 조사회수, 계절 등을 고려하여 각 석호별로 단위회수와 계절에 따라 채집량(catch per unit effort, CPUE)을 표준화(normalization)하였다. 먼저 각 석호에서 사용된 포획도구와 채집

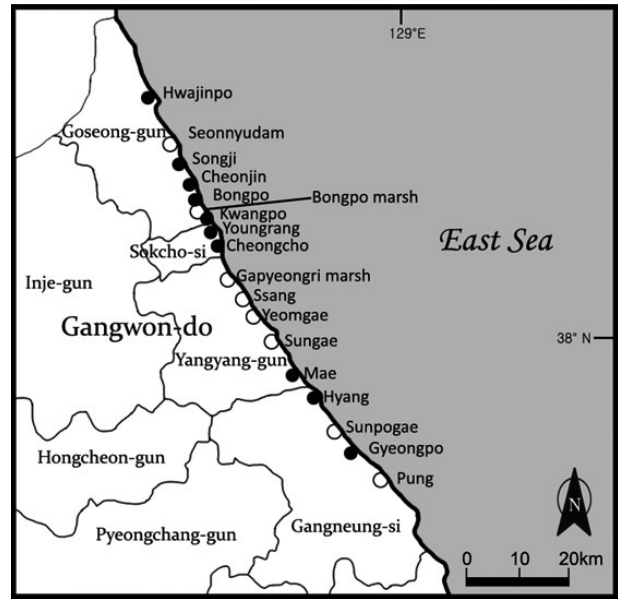


Fig. 1. Map showing the distribution of Korean coastal lagoons (only South Korea). The closed circles show the sampling sites.

시간은 모두 동일하므로 조사회수에 대한 개체수와 무게의 상대치(relative value, RV)를 제시하여 석호별 회유성 어종의 분포 양상을 비교하였다(Park, 2014).

#### 2) 갈대의 안정동위원소분석

갈대의 채집은 유입하천과 해안유출부 사이의 거리를 1/2로 분할한 호안에서 뿌리삽을 이용하여 채집하였다. 갈대시료는 수위의 변동에 따라 침수되는 토양 위에서 30 cm 높이 부근의 줄기를 분석에 이용하였다. 채집한 갈대는 현장에서 비닐 지퍼백에 담아 냉장 보관하여 실험실로 운반한 후 분석하기 직전까지 냉동고(-40°C)에 보관하였다. 건조시킨 시료는 가위를 활용하여 시료를 최대한 미세하고 균질한 입자 형태로 분쇄시킨 후 얻고자 하는 data에 따라 다른 전처리 과정을 아래와 같이 수행하였다. 탄소안정동위원소분석을 위한 시료의 경우 4시간에서 12시간 동안 1.0N HCl(pH=2)에 혼중을 통해 무기탄소를 제거시켰다(Lorrain *et al.*, 2003). 질소안정동위원소분석 시료는 산을 처리하는 과정이 없이 건조 후 분석하기 전까지 밀폐된 공간에 보관하였다.

각 시료에 대한 탄소와 질소안정동위원소분석은 원소질량분석기(EuroEA-IsoPrime irms, GV Instruments, UK, 한양대학교 공동기기장비센터)를 사용하였다. 안정동위원소비는 질량분석기를 이용하여 분석된 표준시료

**Table 1.** Chemical parameters among lagoons. Lagoons name abbreviated Cheongcho; CC, Gyeongpo; GP, Younggrang; YR, Hwajimpo; HJ, Hyang; HY, Songji; SJ, Mae; MA, Kwangpo; KW, Cheonjin; CJ, Bongpo; BP.

Lagoons	Water area (km <sup>2</sup> )			TN loading (kg km <sup>-2</sup> day <sup>-1</sup> )			TP (µg L <sup>-1</sup> )	N/P ratio	Conductivity (µs cm <sup>-1</sup> )	pH	DO (mg L <sup>-1</sup> )	Chl- <i>a</i> (µg L <sup>-1</sup> )
	Paddy	Dry	Forest	Paddy	Dry	Forest						
CC	0.85	14.80	30.52	26.73	14.80	30.52	0.10±0.18	16.8	36511±15310	8.0±0.5	9.8±2.1	8.9±8.2
GP	1.01	31.05	48.99	51.88	31.05	48.99	0.07±0.05	15.0	36209±11980	8.1±0.5	10.2±3.0	9.5±10.4
YR	0.96	6.39	10.50	6.39	3.14	10.50	0.05±0.03	21.6	29793±11651	8.3±0.7	10.5±2.3	22.8±41.4
HJ	2.09	-	-	-	-	-	0.05±0.02	21.4	21597±10230	8.3±0.6	10.7±2.6	22.7±18.4
HY	0.30	5.64	12.42	9.61	5.64	12.42	0.06±0.04	18.8	11926±7012	8.5±0.7	10.9±2.5	25.7±22.7
SJ	0.54	2.18	4.76	3.46	2.18	4.76	0.03±0.02	28.0	9855±4802	8.0±0.6	10.3±2.4	11.9±8.3
MA	0.15	9.39	15.39	9.39	3.16	15.39	0.05±0.04	18.8	9485±6099	8.0±0.7	10.7±2.5	17.3±14.4
KW	0.09	5.40	5.59	5.40	1.20	5.59	0.16±0.14	9.6	6047±5400	8.3±0.8	11.3±3.0	62.0±59.7
CJ	0.03	3.36	2.16	0.43	3.36	2.16	0.02±0.02	37.0	126±46	8.3±0.9	8.8±2.9	9.0±13.4
BP	0.02	-	-	-	-	-	0.04±0.62	21.0	124±49	8.2±0.8	9.6±2.7	25.1±22.1

와 분석시료간의 안정동위원소비 차이를  $\delta$  (‰)로 표현하였고 표준물질은 탄소에 대해 VPDB (Vienna Pee Dee Belemnite), 질소는 N<sub>2</sub>를 표준물질로 사용하였다.

$$\delta X (\text{‰}) = [R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}} - 1] \times 10^3$$

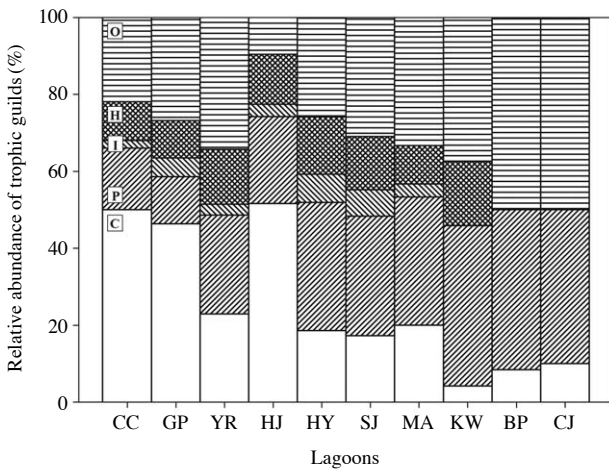
X는 <sup>13</sup>C과 <sup>15</sup>N을 나타내고 R<sub>sample</sub>과 R<sub>standard</sub>는 분석시료와 표준시료의 안정동위원소비 (<sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C과 <sup>15</sup>N/<sup>14</sup>N)이다. 분석에 대한 정밀도는 탄소와 질소가 각각 0.07‰, 0.16‰이었다.

## 결과 및 고찰

### 1. 석호에서의 수질 및 유역 현황

국내 동해안 석호는 유역으로부터 기인하는 인위적인 오염원의 영향을 크게 받고 있는 것으로 알려져 있다 (WREO, 2009; Park and Kwon, 2012). 석호에서의 수질 환경의 특성은 전기전도도 이외의 수질항목에서는 뚜렷한 차이를 보이지는 않았는데, 이는 지형의 변화에 따른 해수와 담수의 혼합의 정도와 인위적인 교란의 영향과 관련이 있는 것으로 사료된다 (Table 1). 전기전도도는 해수의 유입이 수시로 일어나는 청초호(CC), 경포호(GP), 영랑호(YR), 화진포호(HJ) 그리고 향호(HY) 등에서는 높은 값을 보인 반면, 이미 육역화 되어 담수화가 상당히 진행된 천진호(CJ)와 봉포호(BP)에서는 전기전도도가 담수에 가까운 값을 보였다.

한편 pH와 Chl-*a*농도는 각각 8.0~8.5와 8.9~62.0 µg L<sup>-1</sup>의 범위를 보였다. 총질소와 총인은 각각 0.74~1.68 mg L<sup>-1</sup>와 0.02~0.16 µg L<sup>-1</sup>의 범위를 보였다. N/P 비는 9.6~37.0의 범위를 보였는데, 해수의 유입이 상대적으로 원활한 석호의 지형적인 특성과 관련이 있는 것으로 나타났다. 청초호(CC), 경포호(GP) 그리고 광포호(KW)를 제외한 나머지 석호에서는 질소와 인의 원자비 Redfield ratio (16)를 초과하였다. 이는 석호내 광합성 생물의 성장에 인이 제한요인으로 작용하고 있음을 시사한다. 또한 석호유역의 도시화 및 경작지의 분포에 따른 인위적인 오염원의 영향으로 인해 유역으로부터 기인하는 질소원이 석호내에 농축되는 것으로 사료된다 (Newton and Mudge, 2005). 화진포호(HJ)를 제외한 9개의 석호들에서 토지이용(논, 밭 그리고 삼림)에 따른 질소발생부하량은 뚜렷한 차이를 보이지 않았는데, 논, 밭 그리고 삼림이 각각 0.43~51.88 kg km<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>, 1.20~31.05 kg km<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>, 2.16~48.99 kg km<sup>-2</sup>



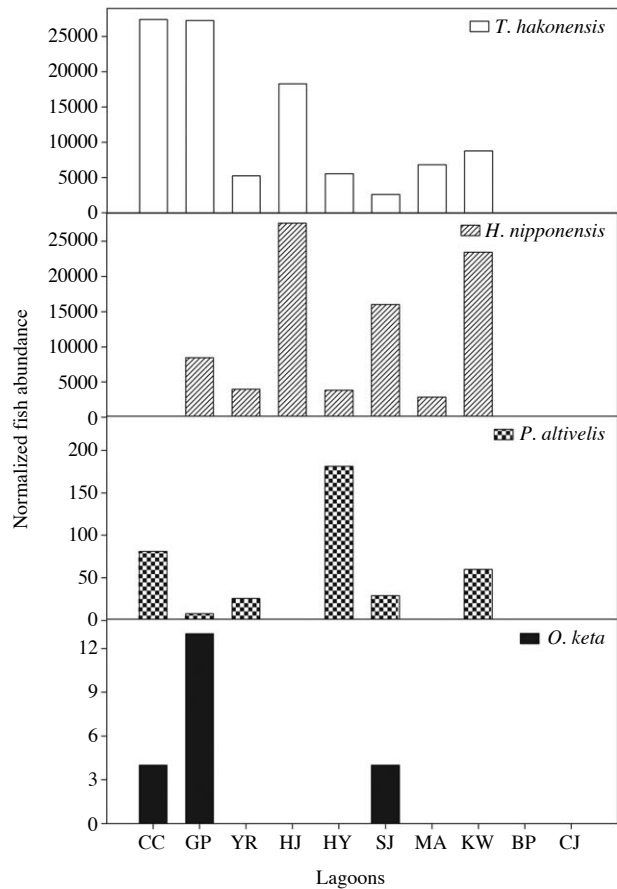
**Fig. 2.** Comparison of relative abundance of fish trophic guilds among lagoons. Sites: Cheongcho; CC, Gyeongpo; GP, Youngrang; YR, Hwajinpo; HJ, Hyang; HY, Songji; SJ, Mae; MA, Kwang-po; KW, Cheonjin; CJ, Bongpo; BP, O; omnivory, H; herbivory, I; insectivory, P; planktivory and C; Canivory.

day<sup>-1</sup>의 범위를 보였다(Table 1).

**2. 어류군집의 식성에 따른 종조성**

본 연구에서는 도감(Kim, 1997)에 제시된 식성에 근거한 어류군집(섭식기능군)의 종조성비를 비교하였다. 우점하는 어종은 대부분 해수어와 회유성 어류로 나타났는데, 육식성 어류는 두줄망둑, 식충성 어류는 빙어, 플랑크톤 섭식성 어류는 멸치, 초식성 어류는 전어 그리고 잡식성 어류는 황어로 나타났다.

본 연구에서는 출현하는 어종별 식성의 차이는 석호의 지형학적인 특성의 차이와 관련이 있었다(Fig. 2). 해수의 영향이 거의 없이 육역화되어 있는 천진호(CJ)와 봉포호(BP)에서는 주로 플랑크톤 섭식성과 잡식성 어종이 우세하였고, 충식성 어류와 초식성 어류의 출현은 없었다. 위에 언급한 석호들과 광포호(KW)를 제외한 나머지 석호들에서는 다양한 식성의 어종이 출현하는 것으로 나타났다. 특히, 청초호(CC), 경포호(GP) 그리고 화진포호(HJ)에서는 육식성 어종의 점유율이 50% 전후로 높았는데, 이는 해수의 직접적인 유입에 따른 영향 때문으로 사료된다(Lee and Lee, 2014). Pombo *et al.* (2005)는 Ria de Aveiro 석호에서 어류의 먹이원을 조사한 결과, 저서성대형무척추동물 및 부식물을 주로 섭식한 것으로 보고한 바가 있다. 따라서 석호별 섭식기능군의 차이는 석호의 지형적인 특성에 따른 영향이 어류의 먹이환경에 반영된 결과인 것으로 사료된다.



**Fig. 3.** Comparison of anadromous fish abundance among study lagoons. Lagoons name showed in Fig. 2.

**3. 회유성 어종의 분포**

석호생태계는 회유성 어류를 포함한 해수어, 기수어 그리고 담수어의 중요한 이동통로이자 성장을 위한 먹이와 세대교번을 거듭할 수 있는 장소이다. 그러나 천진호(CJ)와 봉포호(BP)는 담수호와 비슷한 염분도를 보이고 있을 뿐만 아니라 해수의 직접적인 유입이 차단되어 있기 때문에 회유성 어류는 전혀 채집되지 않았다.

본 연구에서는 회유성 어종 중 황어(*Tribolodon hakonensis*)와 빙어(*Hypomesus nipponensis*)의 개체수가 다른 회유성 어종에 비해 현저하게 많은 개체가 확인되었다(Fig. 3). 황어는 봄철에 하천에서 산란하며 주로 석호나 해양에서 성장한다. 특히 해수의 유입이 다른 조사 석호들에 비해 상대적으로 원활한 청초호(CC)와 경포호(GP) 그리고 화진포호(HJ)에서 많은 개체가 확인되었다.

빙어는 수온이 낮아지는 겨울과 봄철에 산란을 위해

석호의 지류로 소상하는 어류 (Swanson *et al.*, 2000; Arai *et al.*, 2006)로 알려져 있고, 화진포호(HJ), 송지호(SJ) 그리고 광포호(KW)에 주로 분포하는 것으로 파악되었다. 특히 호수의 수심이 낮거나, 바닥에 무산소층이 발생하는 경포호(GP), 영랑호(YR), 향호(HY), 매호(MA) 그리고 청초호(CC)에서는 개체군 크기가 매우 작은 것으로 나타났다(WREO, 2009).

은어(*Plecoglossus altivelis*)는 여름철인 8~9월에 산란하고, 부화 직후 바로 연안으로 내려가 성장하며, 향호(HY)에서 주로 서식이 확인되었다.

그리고 이동거리가 긴 대형어종인 연어(*Oncorhynchus keta*)의 경우에는 청초호(CC), 경포호(GP) 그리고 송지호(SJ)에서만 확인되었다. 연어는 가을철인 10~11월에 하천에 산란하므로 이 시기에 석호와 연안 사이에 해수의 이동이 자유로운 지형을 가진 석호에서 확인되는 것으로 사료된다.

본 연구에서는 유역의 물리적인 환경에 대한 조사를 수행하지는 않았으나 회유성 어류의 출현 및 이동분포를 통해 간접적으로나마 석호의 지형적인 특성을 예측할 수 있을 것으로 사료된다. 동해안을 따라 종적으로 위치하는 석호에서 회유성 어종은 석호의 물리적 환경 요인(갯터짐의 시기와 크기, 수심, 담수유입의 정도, 보의 존재 등)과 이화학적 환경요인(염분도, 수온, 용존산소 등)이 적합한 서식환경을 선택하여 이동 분포하는 것으로 사료된다(Pombo *et al.*, 2005).

석호 사이에서 회유성 어류의 분포 및 개체수의 차이가 발생하는 원인에 대해서는 추가적인 연구가 필요하며, 회유성 어류의 이동분포가 확인된 석호에서는 서식지 보존 및 내수면 자원량 확충을 도모할 수 있는 대책이 마련되어야 한다. 회유성 어류는 대부분 내수면 어족 자원 중 경제성 어류가 대부분이다. 지역적으로 이들 회유성 어류의 이동이 훼손된 석호에 대해서는 복원을 위한 대책마련이 요구된다.

#### 4. 석호 유역의 육역화 및 오염원의 영향

갈대의 줄기  $\delta^{13}\text{C}$ 값의 차이는 육역화가 진행되어 직접적인 해수의 영향이 거의 없는 석호들(천진호; CJ, 봉포호; BP)과 해수의 유입이 빈번한 석호(특히, 청초호; CC) 사이에 뚜렷한 차이를 보이지 않았으나, 석호들 사이에 3‰ 내외의 차이를 보였다(Fig. 4). 이와 같이 차이가 적은 이유는 광합성에 이용하는 무기질의 기원 및 생리적인 메커니즘이 석호의 일차생산자 사이에 거의 비슷하다는 것을 의미한다(Keeley and Sandquist, 1992).

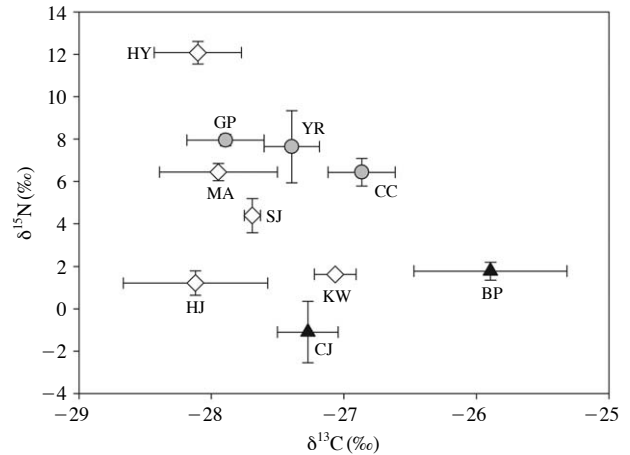
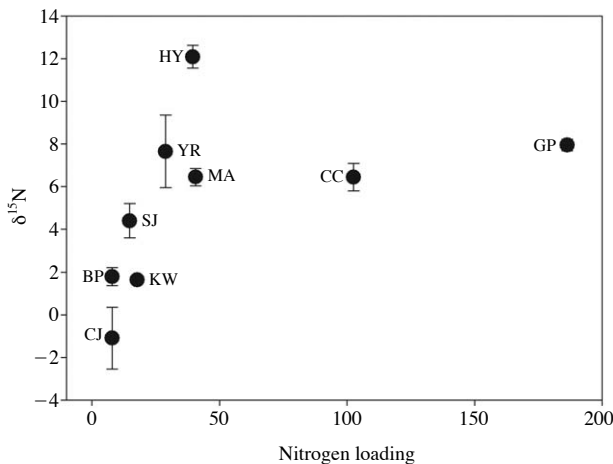


Fig. 4. Carbon and nitrogen stable isotope ratios for *Phragmites communis* Trin. Lagoons name showed in Fig. 2.

몇몇 연구들은 석호 사이에 갈대의 줄기  $\delta^{13}\text{C}$ 값의 차이를 야기시키는 가능한 요인들로 갈대균락이 성장하는 토양 퇴적물의 구성에 따른 기원의 차이, 갈대균락의 밀도, 성장속도 및 토양 퇴적물의 분해  $\text{CO}_2$  등을 언급한 바가 있다(Lee, 1990; Keeley and Sandquist, 1992; Kuramoto and Minagawa, 2001; Cloern *et al.*, 2002; Yu *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2011). Kohzu *et al.* (2008)에 따르면 식물이 광합성 시에 이용할 수 있는 탄소원이 상대적으로 충분한 환경에서 성장한 식물의  $\delta^{13}\text{C}$ 값은 이용할 수 있는 탄소원이 제한적인 환경에서 성장하는 식물의  $\delta^{13}\text{C}$ 값에 비해 가볍다고 하였다. 또한 폐쇄적인 호수환경(boundary layer가 두꺼워져  $\text{CO}_2$ 의 확산이 어려운 환경)이면서 수체의 pH가 알칼리성을 나타내는 이들 석호에서는 이용할 수 있는  $\text{CO}_2$ 의 제한( $\text{HCO}_3^-$ 의 이용 증가)으로 식물  $\delta^{13}\text{C}$ 값이 무거워질 수 있다. 한편 잎의 기공을 통해 대기  $\text{CO}_2$  ( $\delta^{13}\text{C}$ 값; 약  $-8\text{‰}$ )를 직접적으로 고정할 경우, 갈대균락이 성장하는 시기에 토양 유기물에서 기원하여 대기로 확산하는 분해  $\text{CO}_2$ 를 이용할 수 있는 기회의 차이 또한 석호들 사이에서 갈대의 줄기  $\delta^{13}\text{C}$ 값의 차이를 야기시켰을 것으로 사료된다(Keeley and Sandquist, 1992). 결과적으로, 석호들 사이의 갈대의 줄기  $\delta^{13}\text{C}$ 값의 차이는 광합성 과정에서 이용하는 기질의 농도 및 기원에 의한 영향이 클 것으로 사료된다.

흥미로운 것은 본 연구에서 갈대의 줄기  $\delta^{13}\text{C}$ 값의 차이가 작았던 반면, 갈대의 줄기  $\delta^{15}\text{N}$ 값은 석호들 사이에 10‰ 이상의 현저한 차이가 있다는 것이다(Fig. 4). 이와 비슷한 연구사례로서 Human (2009)은 지리적으로 달리 분포하는 7개의 기수호를 대상으로 갈대(*Phrag-*





**Fig. 5.** Comparison of nitrogen stable isotope composition (‰) to total nitrogen loading (kg km<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>) among study lagoons.

*mites australis*)의 잎 δ<sup>15</sup>N값이 10‰가량의 차이가 있음을 보인 바가 있다. 또한 Human (2009)은 East Kleinemonde 석호에서 갈대의 잎이 상류에 분포하는 갈대의 잎 δ<sup>15</sup>N값에 비해 20‰까지도 무거운 값을 보이는데 이는 영양염류의 희석에 의한 상류와 하류 사이의 차이에 기인하기 때문이라고 하였다.

동해안에 분포하는 석호들 사이에서 갈대의 줄기 δ<sup>15</sup>N값이 상당한 차이를 보이는 것은 석호구역에서 발생하는 질소오염부하량과 밀접한 관련성을 가지고 있기 때문이었다(Fig. 5). 석호들 사이에서 현저한 갈대의 줄기 δ<sup>15</sup>N값의 차이는 서로 다른 토양환경에서 성장하는 갈대가 이용할 수 있는 질소원의 δ<sup>15</sup>N값에 차이가 있음을 의미한다.

조사한 석호들 사이에서 화진포호(HJ), 광포호(KW), 천진호(CJ), 봉포호(BP) 등이 비교적 대기 N<sub>2</sub>의 δ<sup>15</sup>N값(≈0‰)에 가까운 값을 보였고, 이외의 석호들(향호; HY, 매호; MA, 송지호; SJ, 경포호; GP, 영랑호; YR, 청초호; CC)에서는 무거운 δ<sup>15</sup>N값을 보였다(Fig. 5). 비록 석호의 경작지 구역에 시비하는 비료의 종류에 대한 분석은 하지 않았으나, 구역의 경작지에 상업용인 화학비료 δ<sup>15</sup>N(-4~4‰)가 주로 살포되는 경우 주변의 갈대 군락은 가벼운 δ<sup>15</sup>N값을 가질 수 있다(Heaton, 1986; Wigand *et al.*, 2001).

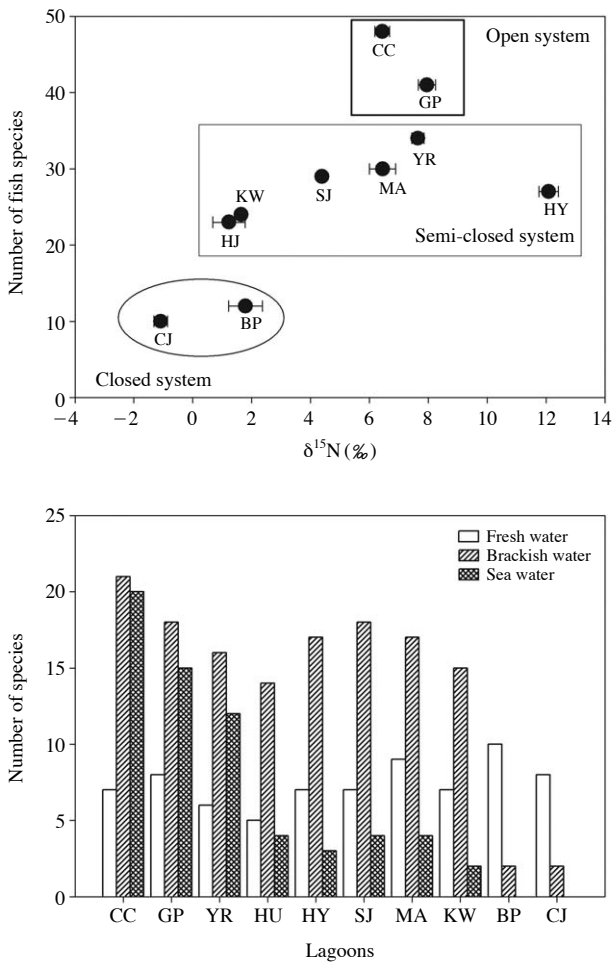
하지만 본 연구결과에서 해수의 영향을 직접적으로 받고 있는 석호들에 분포하는 갈대의 줄기 δ<sup>15</sup>N값은, 지형적인 특성상 비교적 담수의 영향에 노출되기 쉬운 석호 주변에 분포하는 갈대의 줄기 δ<sup>15</sup>N값에 비해 상당히 무거운 C-N map값에 위치하였다(Fig. 4). 이는 이들 석

호에서 성장하는 갈대는 토양내 고정된 대기 N<sub>2</sub>를 이용하는 메커니즘 이외에 석호의 환경요인(염분도, 토양의 습도, 토양내 질소함유량 등)이 갈대의 δ<sup>15</sup>N값에 영향을 미치고 있음을 시사한다(Gannes *et al.*, 1998; Cloern *et al.*, 2002).

기존의 연구결과들에 따르면, 갈대의 줄기 δ<sup>15</sup>N값이 무거운 값을 가지는 석호는 유역으로부터 인위적인 오염원의 영향(생활하수, 축산분뇨) 또는 지하수의 무거운 δ<sup>15</sup>N값에 의한 영향 등에 상당히 노출되는 경우이었다(McCelland and Valiela, 1997; Vitoria *et al.*, 2004; Kohzu *et al.*, 2008; Park and Kwon, 2012). 본 논문에서도 무거운 갈대의 줄기 δ<sup>15</sup>N값을 보이는 석호들 역시 인위적인 오염원의 무거운 δ<sup>15</sup>N값에 의한 영향에 노출되었던 것으로 사료된다. 향호(HY)와 청초호(CC), 경포호(GP) 그리고 영랑호(YR) 등에는 유역의 인구밀도가 높고 축산농가가 분포하고 있었다(WREO, 2009). 반면 천진호(CJ), 봉포호(BP) 그리고 광포호(KW)의 경우에는 유역으로부터의 유입하는 질소오염원은 작았고, 가벼운 갈대의 줄기 δ<sup>15</sup>N값을 보였다. 이는 이들 유역의 인위적인 토지이용(또는 사용하는 비료의 종류)에 따른 영향의 정도가 갈대의 줄기 δ<sup>15</sup>N값에 반영된 것으로 사료된다(Gannes *et al.*, 1998; Human, 2009; Li *et al.*, 2011).

일반적으로 생활하수나 축산분뇨 등은 주로 요소의 형태로 존재하게 되는데, 가수분해를 통해서 pH를 높이고 암모니아(NH<sub>3</sub><sup>+</sup>) 형태로 바뀌어 쉽게 휘발하는 형태가 되기 때문에 이 과정에서 무거운 <sup>15</sup>N는 수중 및 퇴적물에 남겨지고 가벼운 <sup>14</sup>N가 우선적으로 배출되는 속도론적인 동위원소분별이 발생한다. 암모니아는 물에 쉽게 용해되는 질산이온(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)으로 변형되어 식물이 성장하는 과정에서 이용하게 되거나 탈질화되면서 광합성 식물의 δ<sup>15</sup>N값은 무겁게 된다(Lapointe *et al.*, 2005; Benson *et al.*, 2008).

유역으로부터의 질소오염부하량이 크면서도 염분도가 높은 석호들(청초호; CC, 경포호; GP)에 분포하는 갈대의 줄기 δ<sup>15</sup>N값이, 담수의 영향을 크게 받고 상대적으로 질소오염부하량이 적은 석호들(향호; HY, 영랑호; YR, 매호; MA)에 비해서 오히려 무겁거나 비슷하였다(Fig. 5). 이에 대한 원인은 일차적으로 질소원의 기원에 의한 영향일 수 있으나, 추가적인 요인으로 갈대가 성장하는 과정에서 염분의 영향을 담수와 달리 크게 받기 때문인 것으로 사료된다(Seitzinger *et al.*, 1991; Meyerson *et al.*, 2000). 다시 말해서, 유역내 질소오염부하량의 영향을 크게 받으면서 해수의 유입이 원활한 석호들의 경우, 질소제한인 해수에 의한 희석, 염분에 의한 퇴적유



**Fig. 6.** Relationship between nitrogen stable isotope composition and number of fish in the study lagoons (upper panel). Comparison of number of fish species according to habitat in the study lagoons (down panel). Classification of lagoons was by conductivity from the Wonju Regional Environmental Office.

기물의 박테리아 분해를 저해 그리고 염분 스트레스를 완화시키기 위한 생리적인 메커니즘(삼투압) 등에 의한 영향이 질소원을 충분하게 이용하지 못하게 함으로써 갈대의 성장과정에서 <sup>15</sup>N이 식물체내에 지속적으로 누적되기 때문으로 사료된다.

## 6. 어류와 질소안정동위원소의 비교

석호들 사이에 분포하는 어류의 생태형(담수어, 기수어, 해수어)은 염분도에 의존하여 어류생태형의 비율을 달리하는 것으로 나타났다(Fig. 6). WREO (2009)에 따르면 1998~2008년 사이의 염분도는 경포호(GP)와 청초호(CC)에서 8.2~27.6 ppt의 변동을 보인 반면 천진호(CJ), 봉포호(BP)에서는 담수(≒0 ppt)에 가까운 수

질환경특성을 유지하고 있었다. 또한 담수와 해수의 혼합이 빈번한 석호들의 염분도는 1~16.2 ppt의 변동 범위를 보였다.

각 석호에서 어류생태형의 종수에 대한 비율을 살펴본 결과, 청초호(CC), 경포호(GP) 그리고 영랑호(YR) 등에서 해산어의 점유율이 각각 41.7%, 36.6% 그리고 35.3%로 높게 나타났다. 반면, 천진호(CJ)와 봉포호(BP)에서는 해산어의 출현은 없었으며 담수어의 점유율이 각각 80.0%, 83.3%로 높게 나타났다(Fig. 6). 이외의 석호들인 송지호(SJ), 광포호(KW), 매호(MA), 그리고 향호(HY)에서는 기수어의 점유율이 56.7~63.0%의 범위를 보였다. 염분도의 차이는 석호들 사이에서 어류생태형에 따른 종수의 차이를 설명하는 중요한 무생물적인 요인 중 하나임을 시사한다(Rueda and Defeo, 2003; Pombo *et al.*, 2005).

한편, 갈대의 줄기  $\delta^{15}\text{N}$ 값이 무거워질수록 석호에서 식하는 어류의 종수는 증가하는 양상을 보였다(Fig. 6). 갈대의 줄기  $\delta^{15}\text{N}$ 값의 차이는 동해안 석호들의 유역환경(토지이용) 및 지형적인 특성의 차이(폐쇄, 반개방 그리고 개방)를 반영하는 것으로 나타났는데, 어류의 이동이 손쉬운 지형적인 특성(개방된 수환경)을 보이는 석호들일수록 다양한 어종의 출현이 있었다. 이는 어종의 다양성(어종수)이 석호의 지형적인 특성을 반영하는 간접적인 지표로서 활용이 가능함을 시사한다.

결과적으로 본 연구에서 석호들 사이에 갈대의 줄기  $\delta^{15}\text{N}$ 값의 차이가 큰 이유는 석호의 지형적인 특성(담수와 해수 사이의 종적인 연결성의 유무)이 갈대의 성장에 미치는 영향의 차이, 석호마다 유역으로부터 유입하는 오염원의 기원 및 농도에 대한 차이 때문인 것으로 사료된다(Grice *et al.*, 1996; Human, 2009). 또한 석호들 사이에 어종의 다양성에서 차이를 보이는 원인은 석호의 종적인 연결성에 의존하는 것으로 사료된다. 동해안 석호에서 어류의 다양성을 증가시키기 위해서는 석호를 둘러싼 유역환경 및 지형적인 특성을 종합적으로 고려한 보존방안의 마련이 필요할 것으로 사료된다.

## 적 요

본 연구에서는 동해안에서 10개의 석호들을 대상으로 어류군집의 조성의 차이를 파악하였고, 갈대 줄기의 탄소와 질소안정동위원소분석을 통하여 각 석호생태계의 유역환경을 예측하였다. 석호들 사이에서 어류의 조성(특히, 회유성 어류) 및 섭식기능군은 지형학적인 특성에



따라 분포의 차이를 보였다. 10곳의 석호들에서 갈대 줄기  $\delta^{13}\text{C}$ 과  $\delta^{15}\text{N}$ 값 각각  $-28.40 \pm 0.11\text{‰}$ 에서  $-26.87 \pm 0.25\text{‰}$ 과  $-1.09 \pm 1.45\text{‰}$ 에서  $12.08 \pm 0.53\text{‰}$ 의 범위를 보였다. 이들 석호에서의 갈대의 줄기  $\delta^{15}\text{N}$  값의 차이는 토지 이용에 따른 인위적인 오염원의 차이와 석호의 지형학적인 특성 등과 관련이 있음을 보였다. 이 연구는 어류의 서식지 확보, 석호생태계에서의 생물다양성의 보전과 유역의 오염원에 대한 관리를 위한 유용한 정보를 제공할 수 있다.

## 사 사

본 연구는 한양대학교 해양융합과학과의 지원을 받아 수행하였습니다. 본 연구에 도움을 주신 강원대학교 환경연구소부설 어류연구센터 연구원들의 노고에 감사 드립니다.

## REFERENCES

- Anderson, C. and G. Cabana. 2006. Does  $\delta^{15}\text{N}$  in river food webs reflect the intensity and origin of N loads from the watershed? *Science of the Total Environment* **367**: 968-978.
- Arai, T., J. Yang and N. Miyazaki. 2006. Migration flexibility between freshwater and marine habitats of the pond smelt *Hypomesus nipponensis*. *Journal of Fish Biology* **68**: 1388-1398.
- Barile, P.J. 2004. Evidence of Anthropogenic Nitrogen Enrichment of the Littoral Waters of East Central Florida. *Journal of Coastal Research* **20**: 1237-1245.
- Benson, E.R., J.M. O'Neil and W.C. Dennison. 2008. Using the aquatic macrophyte *Vallisneria americana* (wild celery) as a nutrient bioindicator. *Hydrobiologia* **596**: 187-196.
- Borderelle, A.L., D. Gerdeaux, P. Giraudoux and V. Verneaux. 2009. Influence of watershed's anthropogenic activities on fish nitrogen and carbon stable isotope ratios in nine French lakes. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems* **392**: 1-13.
- Choi, E., J.S. Choi, S.C. Park, Y.S. Jang, K.Y. Lee and J.K. Choi. 2007a. Temporal and spatial distribution of fish community in the lagoon Youngrang, Korea. *Korean Journal of Environment and Ecology* **21**: 506-514.
- Choi, K.C., S.R. Jeon, I.S. Kim and Y.M. Son. 2002. Colored illustrations of the freshwater fishes of Korea. Hyangmunsu, Seoul. (in Korean)
- Choi, W.J., G.H. Han, S.M. Lee, G.T. Lee, K.S. Yoon, S.M. Choi and H.M. Ro. 2007b. Impact of land-use types on nitrate concentration and  $\delta^{15}\text{N}$  in unconfined groundwater in rural areas of Korea. *Agriculture Ecosystems and Environment* **120**: 259-268.
- Cloern, E.J., E.A. Canuel and D. Harris. 2002. Stable Carbon and Nitrogen Isotope Composition of Aquatic and Terrestrial Plants of the San Francisco Bay Estuarine System. *Limnology and Oceanography* **47**: 713-729.
- Fry, B. and E.B. Sherr. 1984.  $\delta^{13}\text{C}$  Measurements as indicators of carbon flow in marine and freshwater ecosystems. *Contributions in Marine Science* **27**: 13-47.
- Franco, A., F. Riccato, P. Torricelli and P. Franzoi. 2009. Fish assemblage response to environmental pressures in the Venice lagoon. *Transitional Waters Bulletin* **3**: 29-44.
- Fukuhara, H., F. Nemoto, Y. Takeuchi and N. Toda. 2007. Nitrate dynamics in a reed belt of a shallow sand dune lake in Japan: Analysis of nitrate retention using stable nitrogen isotope ratios. *Hydrobiologia* **584**: 49-58.
- Gannes, L.Z., C.M. del Rio and P. Koch. 1998. Natural abundance variations in stable isotopes and their potential uses in animal physiological ecology. *Comparative Biochemistry and Physiology* **119A**: 725-737.
- Grice, A.M., N.R. Loneragan and W.C. Dennison. 1996. Light intensity and the interactions between physiology, morphology and stable isotope ratios in five species of seagrass. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **195**: 91-110.
- Heaton, T.H.E. 1986. Isotopic studies of nitrogen pollution in the hydrosphere and atmosphere: a review. *Chemical Geology* **59**: 87-102.
- Hoffman, J.C. and D.A. Bronk. 2006. Interannual variation in stable carbon and nitrogen isotope biogeochemistry of the Mattaponi River, Virginia. *Limnology and Oceanography* **51**: 2319-2332.
- Human, L. 2009. Reeds as indicators of nutrient enrichment in the East Kleinmonde estuary. Nelson Mandela Metropolitan University. pp. 108.
- Jackson, J.B.C., M.X. Kirby, W.H. Berger, K.A. Bjorndal, L.W. Botsford, B.J. Bourque, R.H. Bradbury, R. Cooke, J. Erlandson, J.A. Estes, T.P. Hughes, S. Kidwell, C.B. Lange, H.S. Lenihan, J.M. Pandolfi, C.H. Peterson, R.S. Steneck, M.J. Tegner and R.R. Warner. 2001. Historical overfishing and the recent collapse of coastal ecosystems. *Science* **293**: 629-638.
- Keeley, J.E. and D.R. Sandquist. 1992. Carbon: freshwater plants. *Plant, Cell and Environment* **15**: 1021-1035.
- Kim, I.S. 1997. Illustrated Encyclopedia of Fauna and Flora of Korean Vol. 37 Freshwater Fishes. Ministry of education, pp. 518. (in Korean)
- Kim, I.S., Y. Choi, C.L. Lee, Y.J. Lee, B.J. Kim and J.H. Kim. 2005. Illustrated Book of Korean Fishes. Kyohak Press Co., Seoul, pp. 512. (in Korean)
- Kohzu, A., T. Miyajima, I. Tayasu, C. Yoshimizu, F. Hyodo, K. Matsui, T. Nakano, E. Wada, N. Fujita and T. Nagata. 2008. Use of stable nitrogen isotope signatures of riparian

- macrophytes as an indicator of anthropogenic N inputs to river ecosystems. *Environmental Science and Technology* **42**: 7837-7841.
- Kuramoto, T. and M. Minagawa. 2001. Stable carbon and nitrogen isotopic characterization of organic matter in a mangrove ecosystem on the Southwestern coast of Thailand. *Journal of Oceanography* **57**: 421-431.
- Lapointe, B.E., P.J. Barile, M.M. Littler and D.S. Littler. 2005. Macroalgal blooms on southeast Florida coral reefs II. Cross-shelf discrimination of nitrogen sources indicates widespread assimilation of sewage nitrogen. *Harmful Algae* **4**: 1106-1122.
- Lee, E.H., M. Kim, H.M. Kim, M. Son, K.H. Chang and G.S. Nam. 2013. Ecological characteristics and distribution of fish in the downstream region of Gyeongan stream. *Korean Society of Limnology* **31**: 478-485.
- Lee, E.J. and K.S. Lee. 2014. Changes of phytoplankton community with inflow of sea water in Gyoungpo Lake; comparison between 1998 and 2012. *Korean Society of Limnology* **47**: 48-56.
- Lee, J.Y., J.K. Kim, J.S. Choi, J.S. Owen and B. Kim. 2013. Habitat specific variation in stable C and N isotope ratios of pond smelt (*Hypomesus nipponensis*). *Animal Cells and Systems* **17**(3): 213-219.
- Lee, S.Y. 1990. Net aerial primary productivity, litter production and decomposition of the reed *Phragmites communis* in a nature preserve in Hong Kong; management implications. *Marine Ecology Progress Series* **66**: 161-173.
- Li, Z., M. Zhang, T. Cao, M. Zhang, L. Ni, P. Xie and J. Xu. 2011. Variation in stable isotope signatures of the submerged macrophyte *Vallisneria spiralis* collected from several shallow lakes in China. *Journal of Freshwater Ecology* **26**: 429-433.
- Lorrain, A., N. Savoye, L. Chauvaud, Y.M. Paulet and N. Naulet. 2003. Decarbonation and preservation method for the analysis of organic C and N content and stable isotope ratios of low-carbonated suspended particulate material. *Analytica Chimica Acta* **491**: 125-133.
- McCelland, J.W. and I. Valiela. 1997. Nitrogen-stable isotope signatures in estuarine food webs: A record of increasing urbanization in coastal watersheds. *Limnology and Oceanography* **42**: 930-937.
- Meyerson, L.A., K. Saltonstall, L. Windham, E. Kiviat and S. Findlay. 2000. A comparison of *Phragmites australis* in freshwater and brackish marsh environments in North America. *Wetlands Ecology and Management* **8**: 89-103.
- Min, B.M. 2011. Sediment properties and growth of *Phragmites australis* in mud tidal flat. *The Korea Society of Environmental Restoration Technology* **14**: 57-69.
- Myung, J.G. 2002. The sea fishes of Korea. Darakwon Press Co., Seoul. (in Korean)
- Nakai, N. and S.U. Hong. 1982. Paleoclimatic features were examined by the geochemical method with sediments from Lake Yonglang in Korea. *Korean Society of Limnology* **15**: 13-18.
- Nelson, J.S. 2006. Fishes of the world (4th ed.). Wiley, New York.
- Newton, A. and S.M. Mudge. 2005. Lagoon-sea exchanges, nutrient dynamics and water quality management of the Ria Formosa (Portugal). *Estuarine Coastal and Shelf Science* **62**: 405-414.
- Odiete, W.O., R.C. Nwokoro and T. Daramola. 2003. Biological assessment of four courses in Lagos metropolis receiving industrial and domestic waste discharge. *Nigeria Environmental Society* **1**: 1-14.
- Orth, R.J. and K.A. Moore. 1983. Chesapeake Bay: An unprecedented decline in submerged aquatic vegetation. *Science* **222**: 51-53.
- Park, C.R. and J.H. Oh. 2012. The characteristics of waterfowls communities at lagoons in East seashore. *Korean Journal of Nature Conservation* **6**: 42-48.
- Park, K.H. and Y.D. Kwon. 2012. A study on the characteristics of water qualities for lagoon in the eastern coast of Korea - focused on Lake Hyangho -. *The Korea Society for Environmental Analysis* **15**: 124-132.
- Park, S. 2014. Characteristics of fish community according to environmental factors in lagoon, Korea (in Korean). Dissertation for the Degree of Doctor, Biological Sciences, Inha University.
- Pombo, L., M. Elliott and J.E. Rebelo. 2005. Environmental influences on fish assemblage distribution of an estuarine coastal lagoon, Ria de Aveiro (Portugal). *Scientia Marina* **69**: 143-159.
- Rueda, M. and O. Defeo. 2003. Spatial structure of fish assemblages in a tropical estuarine lagoon: combining multivariate and geostatistical techniques. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **296**: 93-112.
- Seitzinger, S.P., W.S. Gardner and A.K. Spratt. 1991. The effect of salinity on aquatic sediments: implications for benthic nutrient recycling. *Estuaries* **14**: 167-174.
- Smith, B.N. and S. Epstein. 1971. Two categories of  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratios for higher plants. *Plant Physiology* **47**: 380-384.
- Swanson, C., T. Reid, P.S. Young and J.J.J. Cech. 2000. Comparative environmental tolerances of threatened delta smelt (*Hypomesus transpacificus*) and introduced wakasagi (*H. nipponensis*) in an altered California estuary. *Oecologia* **123**: 384-390.
- Vitoria, L., N. Otero, A. Soler and A. Canals. 2004. Fertilizer characterization: Isotopic data (N, S, O, C, and Sr). *Environmental Science Technology* **38**: 3254-3262.
- Wada, E., R. Imaizumi and Y. Takai. 1984. Natural abundance of  $^{15}\text{N}$  in soil organic matter with special reference to paddy soils in Japan: biogeochemical implications on the nitrogen cycle. *Geochemical Journal* **18**: 109-123.
- Wigand, C., R. Comeleo, R. McKinney, G. Thursby and M. Charpentier. 2001. Outline of a new approach to evaluate

- ecological integrity of salt marshes. *Human and Ecological Risk Assessment* **7**: 1541-1554.
- Wonju Regional Environmental Office (WREO). 2009. Lagoon Ecosystem Restoration Project Recommendation for Restoration and Management.
- Yu, F., Y. Zong, J.M. Lloyd, G. Huang, M.J. Leng, C. Kendrick, A.L. Lamb and W.W.S. Yim. 2010. Bulk organic  $\delta^{13}\text{C}$  and C/N as indicators for sediment sources in the Pearl River delta and estuary, southern China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **87**: 618-630.