



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

농학석사 학위논문

안정성 동위원소 분석을 이용한  
저어새 (*Platalea minor*)  
유조 먹이의 시공간적 변화

Temporal and Spatial changes in the diets of  
Young Black-faced Spoonbills (*Platalea minor*)  
revealed by Stable Isotope Analysis

2014 년 2 월

서울대학교 대학원  
산림과학부 산림환경학전공  
정 민 수

안정성 동위원소 분석을 이용한  
저어새 (*Platalea minor*)  
유조 먹이의 시공간적 변화

Temporal and Spatial Changes in the Diet of Young  
Black-faced Spoonbills (*Platalea minor*) revealed  
by Stable Isotope Analysis

지도교수 이 우 신

이 논문을 농학석사 학위논문으로 제출함

2014년 2월

서울대학교 대학원  
산림과학부 산림환경학전공

정 민 수

정민수의 석사학위논문을 인준함

2014년 2월

위 원 장 \_\_\_\_\_ (인)

부위원장 \_\_\_\_\_ (인)

위 원 \_\_\_\_\_ (인)

## 초 록

우리나라는 국제적 멸종위기종인 저어새(*Platalea minor*)의 주요 번식지로서 종 보전에 있어 핵심적인 지역임에도 불구하고, 번식 현황과 번식기 채식 습성에 대한 구체적인 정보는 부족한 실정이다. 본 연구는 저어새의 번식현황, 육추기 먹이자원의 지역별 차이 및 연령별 변화 등을 파악하고, 이를 바탕으로 번식기 저어새 서식지의 보전을 위한 관리방안을 제시하고자 하였다. 2013년 3 월에서 7 월까지 구지도, 수하암, 남동유수지, 칠산도의 저어새 번식 둥지 수를 파악하고, 저어새 유조의 첫째날개깃 끝부분(10 일령 성장부분)과 안쪽 깃관(22 일령 성장부분)을 수집하였다. 수집한 깃털에서 탄소 안정성 동위원소( $\delta^{13}\text{C}$ )와 질소 안정성 동위원소( $\delta^{15}\text{N}$ )를 분석하여 유조 먹이원의 지역 및 연령별 차이를 비교하였으며, 탄소 안정성 동위원소의 이원 혼합 모형을 통해 지역 및 연령별 담수성 먹이 및 해수성 먹이 비율을 추정하였다. 본 연구 결과 구지도 149 쌍, 수하암 40 쌍, 남동유수지 93 쌍, 칠산도 27 쌍 등, 총 309 쌍의 저어새의 번식이 확인되었다.  $\delta^{13}\text{C}$  분석 결과에 따르면 저어새는 네 번식지에서 공통적으로 담수습지와 갯벌을 모두 채식지로 이용했으며, 특히 담수습지로부터 가장 멀리 떨어져 있는 구지도에서 오히려 담수성 먹이원의 비율이 가장 높게 나타났다. 또한 22 일령에 성장한 깃털의  $\delta^{13}\text{C}$  가 10 일령에 비해 높게 나타나, 성조가 유조가 성장함에 따라 담수성 먹이의 급이량을 점차 줄이는 것으로 나타났다. 이러한 먹이원 이용의 변화는 갯 부화한 저어새 유조의 염선 발달이 불완전할 것이

라는 가설을 지지하는 것이며, 번식 초기에 담수습지에 대한 의존도가 높을 수 있다는 점을 의미한다.  $\delta^{15}\text{N}$  는 칠산도, 남동유수지 및 수하암, 구지도 순으로 높게 나타났으며, 이는 칠산도의 저어새가 가장 높은 영양단계 또는 질소오염원에 노출된 먹이원을 이용한 반면, 구지도에서는 낮은 영양단계의 먹이원을 이용했거나 질소 오염원의 영향이 적은 채식지를 이용하였기 때문으로 생각된다. 또한 구지도, 수하암, 남동유수지에서는 연령에 따른 변화가 나타나지 않았으나, 칠산도에서는 유조가 성장함에 따라  $\delta^{15}\text{N}$  가 낮아지는 것으로 나타났다. 이는 육추 초기에 칠산도에서 일시적으로 비료와 같은 질소 오염원의 유입에 따른 결과일 수 있으며, 높은 영양단계에 해당하는 먹이원의 가용성이 일시적으로 증가하였을 가능성도 배제할 수 없다고 생각된다. 앞으로 시기 및 지역별 먹이원  $\delta^{15}\text{N}$  의 차이에 영향을 미치는 요인을 파악하기 위해서는 먹이원의 안정성 동위원소 분석과 함께 질소 오염원에 대한 분석이 필요할 것으로 생각된다. 연구 대상지인 구지도, 수하암, 남동유수지, 칠산도는 전체 개체군의 22.67% 이상을 차지하여 저어새 보전에 있어 중요한 번식지임이 확인되었다. 따라서 신규 보호구역 설정, 이해당사자간의 협력, 오염 통제, 대중 인식 증진 프로그램 등을 통해 본 연구에서 확인된 주요 번식지에 대한 보호와 인접한 담수습지와 갯벌 채식지의 적응적 관리가 필요할 것으로 생각된다.

주요어 : 먹이원 변화, 번식 생태, 안정성 동위원소, 저어새, 채식 습성

학 번 : 2012-21115

# 목 차

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| I. 서 론.....                        | 1  |
| II. 연구사.....                       | 6  |
| 1. 저어새에 대한 연구.....                 | 6  |
| 2. 고염분의 떡이가 번식에 미치는 영향에 대한 연구..... | 8  |
| 3. 안정성 동위원소 분석을 이용한 떡이원 연구.....    | 11 |
| III. 연구 대상 지역.....                 | 13 |
| 1. 구지도.....                        | 13 |
| 2. 수하암.....                        | 14 |
| 3. 남동유수지.....                      | 15 |
| 4. 칠산도.....                        | 16 |
| IV. 연구 방법.....                     | 19 |
| 1. 번식 현황.....                      | 19 |
| 2. 저어새 유조 깃털 채집.....               | 21 |
| 3. 깃털 전처리 및 안정성 동위원소 분석.....       | 24 |
| 4. 혼합 모형을 이용한 떡이원 비율 추정.....       | 26 |
| 5. 통계분석.....                       | 28 |

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| V. 연구 결과.....                   | 29 |
| 1. 변식 현황.....                   | 29 |
| 2. 안정성 동위원소 분석.....             | 31 |
| 2.1 탄소 안정성 동위원소의 시공간적 변화.....   | 33 |
| 2.2 혼합 모델을 이용한 먹이원 비율 추정.....   | 35 |
| 2.3 질소 안정성 동위원소의 시공간적 변화.....   | 37 |
| VI. 고 찰.....                    | 40 |
| 1. 변식 현황.....                   | 40 |
| 2. 저어새 유조의 담수 및 해수성 먹이원 비율..... | 42 |
| 3. 질소 안정성 동위원소비의 시공간적 변화.....   | 45 |
| VII. 종합 고찰 및 관리 방안.....         | 48 |
| VIII. 결 론.....                  | 53 |
| IX. 인용문헌.....                   | 55 |

## List of Tables

|  |    |
|--|----|
| Table 1. Total areas (km <sup>2</sup> ) of freshwater and mudflat within 11km and 20km radius from four breeding sites of Black-faced Spoonbills (Guji Island, Suha Islet, Namdong Reservoir and Chilsan Island).....  | 18 |
| Table 2. Schedule for breeding surveys on four breeding sites of Black-faced Spoonbills (Guji Island, Suha Islet, Namdong Reservoir and Chilsan Island) from March to July in 2013.....  | 20 |
| Table 3. Schedule for sample collections and the number of captured young Black-faced Spoonbills in study areas (Guji Island, Suha Islet, Namdong Reservoir, Chilsan Island) in June and July 2013 .....   | 23 |
| Table 4. The number of observed active nests and the total breeding pair on Guji Island, Suha Islet, Namdong Reservoir, and Chilsan Island in 2013 .....   | 30 |
| Table 5. Estimated proportion of freshwater and marine foods in the diet of young Black-faced Spoonbills around 10 days old and 22 days old on Guji Island, Suha Islet, Namdong Reservoir and Chilsan Island derived from two-source $\delta^{13}\text{C}$ diet mixing model ..... | 36 |



## List of Figures

|  |    |
|--|----|
| Figure 1. Location of the study areas (A: Guji Island, B: Suha Islet, C: Namdong Reservoir, D: Chilsan Island). .....  | 17 |
| Figure 2. Distribution of the $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values for primary feathers of juveniles Black-faced Spoonbills from four different breeding colonies .....  | 31 |
| Figure 3. Frequency distribution of the $\delta^{13}\text{C}$ values for the primary feathers of juvenile Black-faced Spoonbills.....  | 32 |
| Figure 4. Frequency distribution of the $\delta^{15}\text{N}$ values for the primary feathers of juvenile Black-faced Spoonbills.....  | 32 |
| Figure 5. The spatial difference in the $\delta^{13}\text{C}$ values from the primary feather of juvenile Black-faced spoonbills on Guji Island, Suha Islet, Namdong Reservoir and Chilsan Island .....  | 33 |
| Figure 6. The $\delta^{13}\text{C}$ values (mean $\pm$ SD) of the primary feather of juvenile Black-faced Spoonbills grown at 10 days and 22 days old, respectively. ....  | 34 |
| Figure 7. The increase of the $\delta^{13}\text{C}$ values (mean $\pm$ SD) in the primary feathers of juvenile Black-faced Spoonbills grown at 10 days and 22days old, respectively on Guji Island, Suha Islet, Namdong Reservoir and Chilsan Island. .... | 34 |
| Figure 8. The spatial difference of the $\delta^{15}\text{N}$ values from the primary feathers of juvenile Black-faced Spoonbills on Guji Island, Suha Islet, Namdong Reservoir and Chilsan Island.....  | 38 |
| Figure 9. The $\delta^{15}\text{N}$ values (mean $\pm$ SD) of the primary feather of juvenile Black-faced Spoonbills grown at 10 days and 22 days old, respectively. ....  | 38 |

Figure 10. The temporal changes in  $\delta^{15}\text{N}$  values (mean  $\pm$  SD) between the primary feather of juvenile Black-faced Spoonbills grown at 10 days and 22 days old, respectively. ....39

# I. 서론

저어새 (*Platalea minor*)는 황새목(Ciconiiformes) 저어새과(Threskiornithidae)에 속하는 중대형의 수조류이며, 국지적인 분포와 2,700여 개체에 불과한 생존 개체군으로 인하여 현재 IUCN Red List에 멸종위기종(endangered species)으로 등재되어 있다(BirdLife International 2001, Yu *et al.* 2013). 저어새의 분포는 동북아시아에 국한되어 있으며, 한반도 서부, 중국의 요녕성 및 러시아 남연해주 지역의 무인도서에서 번식하고, 겨울에는 우리나라의 제주도, 일본, 중국, 대만, 홍콩, 타이완, 마카오, 베트남, 필리핀 등지에서 집단으로 월동한다(BirdLife International 2001, Yu *et al.* 2013). 국내에서는 종 자체를 멸종위기 야생동물 I 급, 천연기념물 제205호로 지정하였으며, 주요 서식지인 강화도 갯벌과 칠산도를 천연기념물 제419호, 제389호로 각각 지정하여 보호하고 있다(김 2006).

저어새는 갯벌, 하구역, 양어장, 해안지역의 농경지 등 주로 해안 지역의 얕은 습지를 서식지로 이용하며, 해안 및 연안의 무인도서에서 집단으로 번식한다(BirdLife International 2001). 이렇게 해안에서 서식하는 조류들은 체내 염분 조절 기관인 염선(salt gland)이 발달해있어 염분의 농도가 높은 해수성 먹이를 이용할 수 있다(Holmes and Phillips 1985). 그러나 저어새와 동일한 과(Threskiornithidae)에 속하며 해안 지역의 염습지에서 번식하는 미

국흰따오기(*Eudocimus albus*)의 경우에는 갯 부화한 유조의 염선 발달이 불완전하기 때문에 주변의 기수역보다 멀리 떨어진 담수습지에서 먹이를 잡아 유조에게 급이하는 하는 것으로 보고되었다(Johnston and Bildstein 1990). 또한 전 세계에 6종이 보고되어 있는 저어새류(*Platalea* spp.)중 저어새를 제외한 다른 종은 주로 담수 습지에서 번식한다는 점에 있어(BirdLife International 2001) 비록 저어새가 해안에서 번식하지만 유조는 성조와 달리 염분 조절 능력이 완전하지 않으며, 따라서 번식지 주변의 담수습지에 서식하는 담수성 생물이 유조의 중요한 먹이원일 것으로 제안된 바 있다(김 2006). 그러나 지금까지 국내의 일부 번식지에서 구토물 조사, 채식지 이용 조사를 통해 저어새가 담수성 먹이를 이용한다는 정도만 확인되었을 뿐(김 등 2001, 김 2004, 김 2006), 유조의 염분 배출 능력 또는 담수성 먹이원의 중요성에 대한 정량적인 연구는 부족한 실정이다.

조류의 채식 생태 연구를 위해 사용된 구토물 및 장내용물 분석과 채식지 이용 조사 등의 전통적인 방법들은 집중적인 조사를 시행하지 않는 한, 먹이에 대한 단편적인 정보만을 제공하며, 특정 먹이 종류의 비율을 과소 또는 과대 평가할 가능성이 존재한다(Votier *et al.* 2003, Inger and Bearhop 2008, Lindsay and Meathrel 2008). 최근 이러한 기존 연구 방법의 한계를 벗어나기 위해 조류의 채식 생태 연구에 있어 안정성 동위원소(stable isotope)를 이용한 접근이 발전되고 있다.

안정성 동위원소란 동위원소 중에서 방사능 붕괴를 하지 않는 원소를 뜻하며, 안정성 동위원소비( $\delta^H X$ )는 물질 내 한 원소에 대한

두 안정성 동위원소간의 비율을 의미한다. 두 안정성 동위원소 간의 화학적 특성은 같으나, 서로 다른 질량을 갖고 있기 때문에 물리화학적 또는 생물학적 반응에서 다른 속도로 반응하여 안정성 동위원소비의 변화를 일으키게 된다(Fry 2006). 이러한 동위원소비의 변화를 동위원소 분별(isotope fractionation)이라 하며, 예측 가능한 방식으로 일어나기 때문에 소비자의 동위원소비는 동화된 먹이원의 안정성 동위원소비를 반영하게 된다(Bearhop *et al.* 2002). 또한 소비자의 안정성 동위원소의 전환율(turnover rate)은 각 조직의 대사율(metabolic rate)에 따라 결정되기 때문에, 분석 조직에 따라 다양한 기간 동안의 먹이원에 대한 정보를 하나의 정량적인 값으로 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다(Hobson *et al.* 1994).

먹이원 연구에 있어 탄소 안정성 동위원소비( $\delta^{13}\text{C}$ )는 육상 및 담수에 서식하는 생물에 비해 해양성 생물에서 높게 나타나기 때문에 소비자의 채식지 이용 또는 먹이원의 생태계 기원 파악에 이용되고 있다(DeNiro and Epstein 1978, Bearhop *et al.* 1999). 이는 동화 과정에 따른  $\delta^{13}\text{C}$  의 분별 효과(fractionation effect)가 1‰ 이내로 매우 미약한 탄소의 특성으로 인해, 각 생태계 먹이망의 주요 영양기저(trophic base)인 육상 식물 및 육상기원 유기물과 식물성 플랑크톤 및 저서 조류(benthic algae) 간  $\delta^{13}\text{C}$  의 차이가 상위포식자의  $\delta^{13}\text{C}$  에 반영되기 때문이다(Hobson and Welch 1992). 이러한 영양기저 간  $\delta^{13}\text{C}$  차이는 육상과 해양생태계에 고정되는 이산화탄소와 중탄산염의  $\delta^{13}\text{C}$  값 차이에 인한 것으로, 대기와 해양표층수(surface ocean water)간 이산화탄소 평형 내 동위원소 교환에 따른 평형 분별(equilibrium fractionation)에 의해 발생한다(Fry 2006). 실제로 대기 중 이산화탄소의  $\delta^{13}\text{C}$  는  $-7\%$ , 표층수의 중

탄산염의  $\delta^{13}\text{C}$  는 1‰ 정도이므로 약 8‰ 정도의 차이를 보인다 (Craig 1953).

질소 안정성 동위원소( $\delta^{15}\text{N}$ )의 경우 생물체에서  $\delta^{15}\text{N}$  가 낮은 암모니아 또는 요소가 우선적으로 배출됨에 따라, 생태계 내에서 생물의 영양단계가 증가할수록 높은  $\delta^{15}\text{N}$  를 가지게 된다(DeNiro and Epstein 1981). 따라서 안정성 동위원소를 이용한 먹이원 연구에 있어 먹이원의 영양단계(trophic level)을 파악하기 위하여 사용되고 있으며, 소비자  $\delta^{15}\text{N}$  는 먹이원에 비하여 약 2-4‰ 정도 높은 값을 가진다. 또한 생물의  $\delta^{15}\text{N}$  은 생활 폐수, 축산폐기물, 비료 등의 질소오염원 노출될 경우 증가하게 되며(Schlacher *et al.* 2005), 이는 질소오염원이 암모니아 휘발, 탈질소작용 등의 질소 전환(nitrogen transformation) 과정 내 동위원소 분별 작용으로 인해 높은  $\delta^{15}\text{N}$  을 갖기 때문에 발생한다(Valiela *et al.* 2000). 일반적으로 자연 상태의 질소원( $\text{NO}_3^-$ )은 4-6‰ 정도를 나타내는 반면, 축산 폐기물, 생활 및 산업 폐수, 비료 등의 질소오염원은 8-25‰의 높은 값을 나타내는 것으로 보고되었다(Kreitler 1979, Heaton 1986, Kendall and McDonnell 1998). 따라서 오염원 유입이 쉬운 수생태계 내의 생물과 이를 먹이로 하는 상위 포식자의  $\delta^{15}\text{N}$  분석은 환경 내 오염원 파악에 있어 유용하게 사용되고 있다(Hebert and Wassenaar 2001, Schlacher *et al.* 2005).

한 생물종의 보전을 위해서는 먼저 대상종의 생물적, 사회적 특징과 서식지 이용에 관한 생태적 정보를 확보하고, 그에 따른 종과 서식지의 보호 및 관리가 이루어져야 한다(Goldsmith 1991). 우리나라 서해안은 현재까지 알려진 개체군의 90% 이상이 번식하는 저어새 보전의 핵심지역이나, 2010년 발표된 저어새 보전 계획(action plan)에 따르면 우리나라의 해안 지역 개발과 갯벌 간척에 따른 서

식지 소실 위협이 심각한 것으로 평가되었다(Chan *et al.* 2010). 또한 향후 보전 방안 수립을 위한 번식지 서식지 이용에 대한 정량적 연구가 요구되고 있다(Chan *et al.* 2010). 따라서 본 연구는 구지도, 수하암, 남동유수지, 칠산도에서 번식하는 저어새를 대상으로 각 번식지의 번식 현황을 파악하고, 저어새 유조 깃털의 탄소 및 질소 안정성 동위원소 분석을 통하여 연령 및 지역간 먹이원의 차이를 파악하고자 한다. 또한 이를 통해 각 번식지의 중요성과 주요 채식지 및 먹이 자원을 파악하여 앞으로 저어새의 보전 및 관리 방안을 제시함을 목적으로 한다.

## II. 연구사

### 1. 저어새에 대한 연구

저어새는 동아시아 해안지역에 국지적으로 분포하는 수조류로 1950년대에는 국내의 흔한 여름철새로 기록되었으나(Hancock *et al.* 1992), 1988년에는 전 세계의 개체군 크기가 총 288마리로 추정되는 등 개체수가 급감하여 멸종 위기에 처한 종으로 간주되었다(Kennerley 1990). 이후 1992년 IUCN 적색목록(Red list)에 심각한 멸종위기종(CR: critically endangered)으로 등록되고(Hancock *et al.* 1992), 저어새 보전 계획(Action Plan for the Conservation of Black-faced Spoonbills)이 수립됨에 따라 저어새 보전 및 생태에 대한 연구가 본격적으로 시작되었다(Chan *et al.* 2010).

저어새에 대한 연구는 최대 월동지인 홍콩과 대만을 중심으로 채식 시간 길이 및 채식 시간대에 대한 연구(Yu and Swennen 2004a), 월동기 서식지 이용 및 서식지 특성(Yu and Swennen 2004b), 먹이원과 채식행동(Swennen and Yu 2005) 및 위 내용물 분석을 이용한 먹이원 연구(Ueng *et al.* 2007) 등 월동생태에 관한 연구가 꾸준히 이루어지고 있다. 국내의 월동지인 제주도에서도 최(2004)에 의하여 도래 현황, 일주행동, 먹이자원, 월동지 이용 등의 전반적인 월동생태에 대한 연구가 이루어졌다. 그 외에도 가락지 부착 및 인공위성 추적조사를 통한 이동경로 및 서식지를 확인하기 위한 연구도 계속되고 있으며(Ueta *et al.* 2002, Wood *et al.* 2013),



유전자 분석을 통한 성별 판별(Cheng *et al.* 2006) 및 과거 개체군 크기 추정(Yeung *et al.* 2006) 등의 연구 등이 있다.

그러나 저어새 번식생태에 대해서는 국외 번식지인 중국 요녕성 지역과 북한 덕도, 국내의 강화도와 전라남도 영광 등에서 번식 현황 및 기초적인 번식 생태에 대한 연구가 이뤄졌을 뿐(Chong *et al.* 1996, Chong *et al.* 2000, Wei *et al.* 2005, 김 2004, 문화재청 2006, 2011) 여전히 번식기 저어새의 생태 및 행동은 자세히 밝혀지지 않은 상황이다. 번식기 채식 습성에 대한 연구로는 구토물 및 위장 분석을 통한 먹이 중 확인이 대부분이었으며(원 1963, 정 1998, 김 등 2001, 김 2004), 유도 번식 개체군의 채식 행동 및 월별 채식지 이용률 조사를 통해 시기별 저어새 먹이자원 이용 양상이 달라질 것이라는 가설이 제기되었다(김 2006). 그러나 아직까지 먹이원 이용에 대한 정량적인 분석과 시기 및 지역별 비교에 대한 연구는 이루어지지 않은 상황이다.

본 연구 대상지인 구지도, 수하암, 남동유수지, 칠산도에서 번식하는 저어새 개체군의 먹이자원에 대한 연구는 이뤄진 바 없으며, 또한 지리적으로 떨어져 있어 서로 다른 서식환경을 갖고 있기 때문에, 지역간 먹이원 및 채식지 이용 비교를 통해 저어새 채식생태에 대한 전반적인 이해가 가능할 것으로 생각된다. 특히 수하암과 남동유수지의 경우 인천 해안 지역의 지속적인 개발과 간척으로 서식지 소실이 계속되고 있어 앞으로 보전방안 수립을 위하여 먹이 자원과 채식지 이용에 대한 정량적인 연구가 필요하다고 생각된다.

## 2. 고염분의 먹이가 번식에 미치는 영향에 대한 연구

해안에서 서식하는 조류는 먹이에 의해 고농도의 염분을 섭취하게 되지만 염선을 통해 염분 농도가 해수보다 높은 용액을 분비함으로써 체내 삼투압의 조절이 가능하다(Purdue and Haines 1977). 그러나 유조의 경우에는 염선의 기능이 완전하지 않고, 비행능력이 없어 담수로의 접근이 불가능하기 때문에 체내 염분 축적으로 인한 수분 스트레스를 겪을 수 있다(Johnston and Bildstein 1990). 또한 염선을 통한 염분 분비는 많은 에너지를 필요로 하기 때문에 체내 과도한 염분 축적은 유조의 성장을 저해할 수 있다(Burger and Gochfeld 1984).

수리갈매기(*Larus glaucescens*)에 대한 염분 섭취 실험 결과, 유조의 성장에 따라 혈장 이온 농도 및 삼투압의 감소와 염선 분비액의 이온 농도의 증가했다는 결과가 보고되었다(Hughes *et al.* 1987). Laughing Gull (*Larus atricilla*)에서도 유조의 성장에 따라 염선이 기능이 발달하고, 부화 초기에 염분을 섭취한 유조가 염분을 섭취하지 않은 유조에 비해 성장률이 낮다는 결과가 보고되었다(Dosch 1997). 미국흰따오기의 경우에는 부화 약 20일 후에 염선이 완전히 발달하는 것으로 알려져 있었으나, 21일령의 유조에게 고염분의 먹이를 급이한 결과, 먹이 섭취 감소, 탈수, 체내 염분 축적 등이 나타났다(Johnston and Bildstein 1990). 이러한 연구 결과들은 실제로 과도한 염분 축적이 유조의 성장과 조류의 번식을 방해할 수 있음을 보여준다.

해안에서 번식하는 종에서 해수성 먹이 내 고농도의 염분에 의한 유조의 성장 저하 및 번식 실패를 막기 위하여, 행동적 또는 생리적 방법을 통하여 유조에 대한 과도한 염분 축적을 방지하는 것으로 알려져있다. Common Eider (*Somateria mollissima*)는 연체 동물에 비해 염분 농도가 낮은 갑각류와 복족류를 선택적으로 이용하는 것으로 나타났으며(Nystrom and Pehrsson 1988), California Gull (*Larus californicus*)에서는 체액을 통해 희석된 먹이를 급이하는 것이 보고되었다(Mahoney and Jehl 1985). Laughing Gull 및 미국 흰따오기의 경우 번식지 주변의 기수역이 아닌 멀리 떨어진 담수습지에서 먹이를 급이하여 유조의 정상적인 성장이 가능하게 하는 것으로 나타났다(Bildstein *et al.* 1990, Dosch 1997, 2003).

해안의 번식지에서 성공적인 번식을 위해 담수성 먹이를 이용해야 한다면, 해당 종의 번식에 있어 번식지 주변의 담수습지와 담수성 먹이 가용성이 매우 중요한 요인일 것이다. 1970년대 트리니다드 캐로니늪(Caroni swamp, Trinidad)의 염류화 이후 홍따오기 (*Eudocimus ruber*)의 번식이 중단되고, 그 이후에는 비번식 개체의 채식지 또는 휴식지로만 사용되고 있다는 연구결과가 발표되었다(Bildstein 1990). 또한 홍따오기를 포함한 10종의 따오기류(*Ibis* spp.)의 번식개체군 크기와 번식성공률이 담수습지와 담수성 먹이의 가용성의 변화에 영향을 받는다는 결과가 보고되었다(DeSanto *et al.* 1997).

아직까지 저어새 유조가 염분에 취약할 것이라 가설에 대한 직접적인 증거는 미비하지만, 저어새가 멸종위기종 및 천연기념물로 지정되어 있어, 사육 및 실험을 통한 염분 조절 능력에 대한 연구는 어려운 상황이다. 가설과 같이 저어새 유조가 같은 저어새과에 속하는 따오기류와 같이 해수성 먹이 섭취에 따른 염분 축적에 취약하

다면, 저어새 번식에 있어 담수성 먹이 및 담수습지의 가용성이 영향을 미칠 것으로 생각된다. 따라서 본 연구를 통해 저어새 유조에 있어 담수성 먹이의 중요성과 유조의 성장에 따른 담수성 먹이 비율의 변화를 파악하는 것이 필요한 것으로 판단된다.

### 3. 안정성 동위원소 분석을 이용한 먹이원 연구

먹이원 연구에 있어 안정성 동위원소 분석은 먹이의 동위원소비가 소비자의 동위원소비에 반영됨을 원리로 하기 때문에, 소비자 조직에 동화되는 먹이원에 대한 파악이 가능하다(DeNiro and Epstein 1978, 1981). 특히 안정성 동위원소 분석을 이용한 연구에서 주로 이용하는 탄소의 경우 내해와 외해 또는 육지(담수)와 해양(해수) 사이의 먹이원 이용을 파악할 수 있으며(Hobson 1990, Hobson *et al.* 1994, Mizutani *et al.* 1990), 질소의 경우에는 먹이원의 영양단계를 반영한다(DeNiro and Epstein 1981).

안정성 동위원소를 이용한 조류의 채식 생태 연구로는 개체 별 먹이 이용 비교(Inger *et al.* 2006), 성별 간 먹이 영양 단계 차이에 대한 연구(Forero *et al.* 2005), 동소성 조류에서 유조에게 급이하는 먹이원 차이에 대한 연구(Bocher *et al.* 2000) 등 종내 및 종간 먹이 자원 분할에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 또한 조직(혈액, 근육, 깃털)의 종류에 따라 다양한 시간적 범위 동안의 먹이원에 대한 정보를 반영하기 때문에, 여러 조직의 분석을 통해 시간에 따른 먹이원 이용의 변화에 대한 연구도 지속적으로 이뤄지고 있다(Inger *et al.* 2006, Steenweg *et al.* 2011).

깃털과 같은 케라틴 조직은 대사적으로 불활성적이기 때문에 조직이 생성된 이후에는 안정성 동위원소비의 변화가 일어나지 않는다. 따라서 깃털의 안정성 동위원소는 자라는 시기의 먹이원을 반영하며(Hobson and Clark 1992, Bearhop *et al.* 2002) 이를 바탕으로

다른 시기에 자란 깃털의 분석을 통해 시기별 먹이원 이용의 변화를 파악하는 연구가 이뤄지고 있다(Hobson 1990, Mizutani *et al.* 1990, Bearhop *et al.* 1999). 또한 Thompson and Furness(1995)는 북방플마갈매기(*Fulmarus glacialis*)의 첫째날개깃의 끝과 아래부분 사이에 동위원소의 변화가 나타남을 보임으로써, 깃털을 이용하여 깃털이 자라는 동안의 먹이원 변화에 대한 연구가 가능하다는 것을 보였다. 이후 Laughing gull, 노랑부리저어새(*Platalea leucorodia*) 유조의 첫째날개깃을 이용하여 시간에 따른 유조의 해수성 및 담수성 먹이 비율 및 먹이 영양단계 변화에 대한 연구가 이루어졌다(Knoff *et al.* 2002, El-Hacen 2010).

현재까지 이뤄진 번식기 저어새 채식 습성 연구에서 사용된 구토물 및 위 내용물 조사 또는 행동 관찰 등은 먹이 자원 이용 및 채식지 이용에 대한 단편적이고 간접적인 정보만을 얻을 수 밖에 없다는 한계를 가지고 있었다. 반면 안정성 동위원소 분석은 장기간 동안 실제로 조직에 동화되는 먹이원에 대한 정보를 얻을 수 있다. 특히 깃털의 안정성 동위원소 분석은 소량의 시료만을 필요로 하며, 개체당 한 번의 채집만으로도 여러 성장단계의 먹이원에 대한 정보를 얻을 수 있다(Thompson and Furness 1995). 따라서 본 연구에서는 저어새 유조 깃털의 안정성 동위원소를 분석하여 멸종위기종인 저어새에 대한 간섭을 최소화하는 동시에 번식기 채식 습성에 대한 정량적 분석 및 통합적인 이해가 가능할 것으로 판단된다.

### Ⅲ. 연구 대상 지역

본 연구는 인천시 옹진군 구지도, 인천시 중구 수하암, 인천시 남동구 남동유수지, 전라남도 영광군 칠산도 등 총 네 곳의 저어새 번식지에서 진행되었다(Figure 1). 번식지 별 환경 요인의 차이를 알아보기 위하여, 기존 번식지 저어새의 채식지까지 이동거리가 20km 이며, 육추기인 5 월에는 주로 11km 이내의 채식지를 이용한다는 연구 결과(김 2006)를 바탕으로, 환경부 2009 년 토지피복도와 ArcMap 9.3 을 이용하며 각 번식지 별 11km, 20km 반경 내 담수습지 면적 및 갯벌 면적을 추출하였다(Table 1). 구지도의 경우 대부분의 채식지역이 북한에 속해 있어 토지피복도가 제작되지 않았기 때문에 조(2010)의 연구 결과를 참고하였다.

#### 1. 구지도

구지도는 북위 37° 38' 17", 동경 125° 40' 54"에 위치하며, 행정구역상 인천광역시 옹진군 연평면 연평리에 속하여 있다. 면적 5.01ha 의 무인도서이며, 대연평도와는 약 1.5km 떨어진 곳에 위치한다(환경부 2006; Figure 1-A).

섬 전역에 걸쳐 초본식생이 넓게 분포하고 있으며, 강아지풀(*Setaria viridis*), 여뀌(*Polygonum hydropiper*), 개여뀌(*Polygonum longisetum* Bruijn), 흰명아주(*Chenopodium album*), 쇠비름(*Portulaca oleracea*), 소리쟁이(*Rumex crispus*), 담쟁이덩

굴(*Parthenocissus tricuspidata*) 을 포함한 10과 19종이 기록되어 있다(조 2010). 목본류는 섬 가장자리에 적은 수가 분포하여 있으며, 담쟁이덩굴(*Parthenocissus tricuspidata*) 소사나무(*Carpinus turczaninowii*), 보리수나무(*Elaeagnus umbellate*), 떡갈나무(*Quercus dentate*), 산벚나무(*Prunus sargentii*), 물푸레나무(*Fraxinus rhynchophylla*)등 이 생육하는 것으로 보고되었다(조 2010).

구지도는 육지로부터 20km 거리에 있으며, 저어새 번식지 중 가장 육지에서 멀리 떨어져 있는 번식지이다. 번식지 주변의 이용 가능한 채식지로는 연평도 남단의 갯벌이 약 2km 정도 거리에 위치하며, 황해남도 강령군 내 갯벌과 농경지 및 담수호가 20km이상 떨어진 곳에 위치한다. 번식지 채식거리로 알려진 반경 20km내 논 의 면적은 0.73 km<sup>2</sup>, 갯벌은 51.46km<sup>2</sup> 로 보고되었다(조 2010; Table 1).

## 2. 수하암

수하암은 영종도 북단에서 2km 정도 떨어진 갯벌 사이에 있는 바위섬으로, 행정구역상 인천광역시 중구 운북동에 속하며 북위 37° 32' , 동경 126° 32' 에 위치하고 있다(Figure 1-B). 해발고도 6m, 길이 40m, 폭 10m로 총 면적 0.06ha 정도이나, 주변 갯벌의 수심이 약 4m로 낮아 만조 시에는 전체 면적의 70% 정도가 물에 잠기게 된다. 섬의 암반은 판암으로 이루어져 있으며, 토양층이 형성되어 있지 않아 식생이 거의 자라지 않는다. 섬 주변의 갯벌에는 갯골이 발달하였으며 칠면초(*Suaeda japonica*) 군락이 있다(문화재청 2006, 조 2010).



수하암 주변의 이용 가능한 채식지로는 갯벌의 경우 섬 주변 영종도 북단 및 강화도 남단의 갯벌로 약 1km 이내에 위치하고 있으며, 담수습지의 경우 강화도 남단의 논으로 약 10km 거리에 위치하고 있다(이 등 2005, 문화재청 2006). 11km 반경 내 담수 습지의 면적은 42.81km<sup>2</sup>이며, 갯벌 면적은 89.88 km<sup>2</sup>이며, 20km 반경 내 담수 습지의 면적은 160.78 km<sup>2</sup>이며, 갯벌의 면적은 133.83km<sup>2</sup>이다(Table 1).

### 3. 남동유수지

남동유수지는 행정구역상 인천광역시 남동구 고잔동 남동공단내 홍수방지 및 하천수 방류를 목적으로 설치된 유수지로, 유수지 중앙에 위치한 원형의 인공섬이 저어새 번식지로 이용되고 있다(조 2010). 인공섬의 크기는 아래 지름이 평균 28m, 상단지름은 12m, 높이 6m정도이다. 섬은 상단은 대부분 흙이 노출된 상태이며 과거 식재된 아까시나무(*Robinia pseudoacacia*)가 고사목 상태로 일부 남아있다(조 2010; Figure 1-C).

남동유수지 주변 이용 가능한 갯벌 채식지로는 약 2km 떨어진 곳의 송도 갯벌 및 고잔 갯벌이 있으며, 담수습지의 경우 시화호 내 담수화 된 지역인 대송 예정 단지로 남동유수지로부터 약 10km 떨어진 곳에 위치한다(이 미발표 자료). 11km 반경 내 담수 습지의 면적은 17.31km<sup>2</sup>이며, 갯벌의 면적은 31.08km<sup>2</sup>이다. 20km 반경의 경우, 담수 습지의 면적은 95.84 km<sup>2</sup>이며, 갯벌의 면적은 146.69km<sup>2</sup>이다(Table 1).

## 4. 칠산도

전라남도 영광군 낙월면 송이리에 속하는 칠산도는 7개의 무인도로 이루어진 군도로, 북위 34° 08' 동경 125° 07' 에 위치하고 있다(Figure 1-D). 꿩이갈매기(*Larus crassirostris*), 노랑부리백로(*Egretta eulophotes*), 저어새가 번식하는 지역으로 1997년에 섬 주변의 공유 수역을 포함한 면적 23.27ha가 천연기념물 제389호로 지정되어 있다(문화재청 2011).

7개의 섬 중에서 만조 시 물에 잠기는 작은 바위섬 두 곳을 제외한 섬에는 정상부와 경사면에 식생이 분포해 있다. 주요 식생은 밀사초(*Clerodendrum trichotomum*), 명아주(*Chenopodium album*), 유채(*Brassica napus*)로 이루어져 있으며, 정상부에는 예덕나무(*Mallotus japonicas*)와 보리수나무(*Elaeagnus unbellata*)가 군락을 이루고 있다(문화재청 2011).

칠산도에서 이용 가능한 채식지로는 영광군 백수읍에 위치한 백수 갯벌 및 간척논이 있으며 칠산도로부터 약 9km 정도 떨어진 곳에 위치하고 있다(이 2010). 11km 반경 내 담수 습지의 면적은 18.66 km<sup>2</sup> 이며, 갯벌의 면적은 10.08km<sup>2</sup> 이다. 20km 반경 내의 경우 담수 습지 106.81km<sup>2</sup>, 갯벌 25.96 km<sup>2</sup> 이다(Table 1).

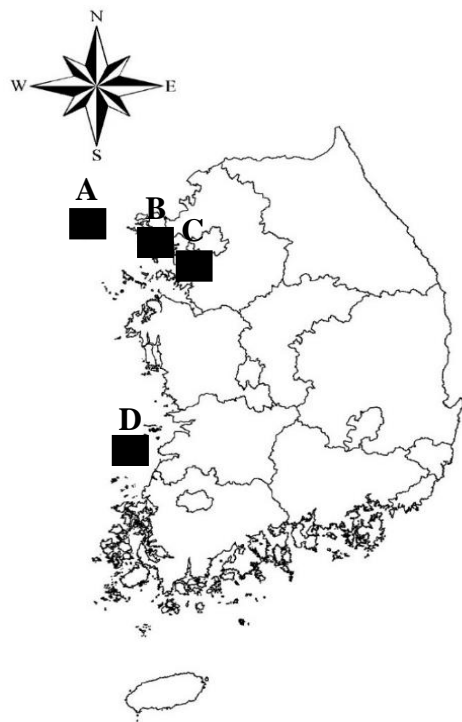


Figure 1. Location of the study areas (A: Guji Island, B: Suha Islet, C: Namdong Reservoir, D: Chilsan Island)

**Table 1. Total areas (km<sup>2</sup>) of freshwater and mudflat within 11km and 20km radius from four breeding sites of Black-faced Spoonbills (Guji Island, Suha Islet, Namdong Reservoir and Chilsan Island)**

|                          | 11km radius |         | 20km radius |         |
|--------------------------|-------------|---------|-------------|---------|
|                          | Freshwater  | Mudflat | Freshwater  | Mudflat |
| Guji Island <sup>a</sup> | 0.00        | 0.00    | 0.73        | 51.46   |
| Suha Islet               | 42.81       | 89.88   | 160.78      | 133.83  |
| Namdong Reservoir        | 17.31       | 31.08   | 98.84       | 146.69  |
| Chilsan Island           | 18.66       | 10.08   | 106.81      | 25.96   |

<sup>a</sup>Data from 조(2010)

## IV. 연구 방법

### 1. 번식 현황

2013년 3월부터 7월까지 저어새의 번식 현황을 파악하기 위하여 저어새 번식지 현지 조사를 실시하였다. 번식지 조사로 인한 교란을 줄이기 위하여, 사진기로 번식지 상황을 촬영하여 번식지에 머무는 시간을 최소화 하였다. 이후 번식지에서 촬영한 사진 분석을 통해 각 번식지의 둥지 수를 파악하였다. 번식 둥지 수 파악 시에는 번식 둥지 중 알이 1개 이상의 확인된 둥지만 번식을 시도한 것으로 정의하였다(Raemacha and Delgado 2009).

총 14회 번식지 조사를 실시하였으며, 구지도는 6월 1회 조사를 실시하였다. 수하암의 경우 4월 각 2회, 5월 1회, 6월 각 2회, 7월 각 2회 총 7회의 조사를 실시하였다. 남동유수지의 경우 3월 1회, 4월 1회, 6월 1회, 7월 1회 총 4회 조사를 실시하였다. 칠산도에서는 5월 1회 6월 1회 총 2회 조사를 실시 하였다(Table 2).

**Table 2. Schedule for breeding surveys on four breeding sites of Black-faced Spoonbills (Guji Island, Suha Islet, Namdong Reservoir and Chilsan Island) from March to July in 2013**

| Study Area        | The number of survey(s) | Dates  |
|-------------------|-------------------------|--|
| Guji Island       | 1                       | June 23-24   |
| Suha Islet        | 7                       | April 15, April 29, May 30, June 11, June 27, July 10, and July 26 |
| Namdong Reservoir | 4                       | March 16, April 14, June 26, and July 20                           |
| Chilsan Island    | 2                       | May 26 and June 22   |

## 2. 저어새 유조 깃털 채집

본 연구에서는 시기 및 지역별 저어새 유조의 먹이원의 변화를 파악하기 위해 저어새 유조의 깃털 안정성 동위원소 분석을 실시하고자 했으며, 이를 위해 2013년 6-7월에 저어새 유조 포획 및 깃털 채집을 실시하였다(Table 3).

지역별 저어새 유조 먹이의 차이를 파악하기 위하여 구지도 1회, 수하암 2회, 남동유수지 2회, 칠산도 1회 총 6회의 포획 및 깃털 채집을 실시하였다. 포획 시기는 저어새의 포란기 25일, 육추기 35일을 기준으로 (Chong *et al.* 1996) 4, 5월의 번식현황을 바탕으로 하여, 번식 준비 또는 포란 중인 둥지가 적고, 이소 전의 유조가 가능한 많은 시기를 추정하여 결정하였다. 뜰채 망을 이용해 부화 후 20일에서 30일 정도 지난 유조를 포획하였으며, 그 결과 구지도 6개체, 수하암 8개체, 남동유수지 9개체, 칠산도 13개체, 총 36개체를 포획하였다.

저어새 유조가 이용한 먹이의 시간적 변화를 파악하기 위하여 유조의 첫째날개깃 8번의 끝부분(0-0.5cm)과 끝부분에서 안쪽 방향으로 8cm 떨어진 부분(8-8.5cm)에서 가로 0.5cm, 세로 1cm 정도를 가위로 잘라내어 1.5ml 튜브에 보관하였다. 저어새의 유조의 첫째날개깃은 부화 10일 후에 자라는 것으로 알려져 있으나, 그 이후 깃털의 성장률은 아직 밝혀지지 않았다. 따라서 근연종인 노랑부리저어새 (*Platalea leucorodia*) 유조의 첫째날개깃이 하루에  $6.5 \pm 0.4$ mm씩 자란다는 결과(El-Hacen 2010)를 바탕으로 채집한 깃털

이 자란 시기를 추정할 때, 바깥 부분의 경우 부화 후 10일경, 안쪽 부분은 부화 후 22일경에 성장한 것으로 판단하였다.



**Table 3. Schedule for sample collections and the number of captured young Black-faced Spoonbills in study areas (Guji Island, Suha Islet, Namdong Reservoir, Chilsan Island) in June and July 2013**

| Study Area        | Capture and sampling dates | The number of captured juveniles |
|-------------------|----------------------------|----------------------------------|
| Guji Island       | June 23-24                 | 6                                |
| Suha Islet        | June 11 and June.27        | 8                                |
| Namdong Reservoir | June 26 and July 20        | 9                                |
| Chilsan Island    | June 22                    | 13                               |

### 3. 깃털 전처리 및 안정성 동위원소 분석

저어새 유조의 시기 및 지역별 먹이원의 변화를 파악하기 위해 총 36개체로부터 채집한 72개 깃털 조각의 탄소 안정성 동위원소비( $\delta^{13}\text{C}$ ) 및 질소 안정성 동위원소( $\delta^{15}\text{N}$ )의 분석을 실시하였다.

깃털 표면의 오염물질은 깃털의 안정성 동위원소비에 영향을 미칠 수 있기 때문에 분석 전 Paritte and Jeffrey (2009)의 방법에 따라 깃털 표면의 오염물질을 제거하였다. 우선 흡 후드(Fume hood)에서 클로로포름-메탄을 혼합액(2:1)과 깃털 조각을 1.5ml 튜브에 넣고 30초간 흔들어서 세척한 후 하루 동안 흡 후드(Fume hood)에서 건조하였다. 건조된 깃털은 다시 세정제(Deconex 16 plus)를 3차이온수(Deionized water)로 1/30배 희석한 용액을 이용해 이전과 같은 방식으로 세척하고, 세정제가 용액에 남아있지 않도록 3차이온수로 3번 헹구어 낸 후 하루 동안 흡 후드에서 건조시켰다(Paritte and Jeffrey 2009). 건조된 깃털은 해부용 가위를 이용하여 작은 조각으로 잘라 균질화 하였다(Cherel *et al.* 2000).

깃털 시료는 서울대학교 농생명과학공동기기원(NICEM)의 안정성 동위원소 실험실의 안정성 동위원소분석기(stable isotope ratio mass spectrometer system with elemental analyzer: SIRMS, Micromass Ltd. UK)를 사용하여 분석을 실시하였다. 또한 탄소 및 질소 동위원소 구성비( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ )는 아래의 식을 통해 계산하였다.

$$\delta X(\%) = [(R \text{ sample}/R \text{ standard}) - 1] \times 1000$$

위 식에서 X는  $^{13}\text{C}$ 와  $^{15}\text{N}$ 을 의미하며, R sample은 표본의 동위원소비를, R standard은 표본 물질 (isotope standard reference material)의 동위원소비를 의미한다.  $\delta^{13}\text{C}$ 의 표본물질은 PDB (Pee Dee Belemnite)로,  $\delta^{15}\text{N}$ 의 표본물질은 공기 내 질소가스로 지정되어 있다.

#### 4. 혼합 모형을 이용한 먹이원 비율 추정

저어새 유조 깃털의 탄소 안정성 동위원소( $\delta^{13}\text{C}$ )에 대하여 이원 동위원소 혼합 모델(Two-source isotopic mixing mode)을 사용하여 시기 및 지역별 담수 및 해수성 먹이원의 비율을 계산하였다. 이원 혼합 모델은 소비자가 2 종류로 대표되는 먹이원(먹이원 A, B)을 이용한다는 가정하에, 소비자에 동화된 먹이원의 비율을 계산하는데 사용되는 모델이다. 소비자의 안정성 동위원소 값과 먹이원 A, B의 안정성 동위원소에 대한 관계는 다음의 물질 균형식(mass balance equations)으로 표현된다(Phillips and Gregg 2001).

$$\bar{\delta}_M = f_A \bar{\delta}_A + f_B \bar{\delta}_B$$

$$1 = f_A + f_B$$

위의 식에서  $\bar{\delta}_M$ 는 소비자 전체 먹이원의 동위원소비를 나타낸다. 그러나 먹이원이 소비자 조직에 동화되는 과정은 분별, 즉  $\delta^{13}\text{C}$ 의 증가를 일으키기 때문에 소비자의  $\delta^{13}\text{C}$ 를 모델에 적용하기 위해서는 분별 효과의 조정이 필요하다(Phillips and Gregg 2001). 분별 효과는 분류군, 조직, 먹이 등에 따라 변하기 때문에(Minagawa and Wada 1984, Ben-david and Schell 2001, Vanderkluft and Ponsard 2003), 실험으로부터 계산된 값이 아닌, 기존 문헌을 참고할 경우 어떤 값을 선택하느냐에 따라서 혼합모형의 결과에 큰 영향을 미칠 수 있다(Ben-david and Schell 2001). Caut *et al.* (2009)는 현재 까지 이뤄진 혼합모형과 분별계수에 관한 연구의 총설을 통해, 지질 추출, 종, 조직, 먹이 등의 요인이 분별계수에 미치는 영향을 파악하

고, 이를 바탕으로 먹이원에 따른 각 분류군의 조직(tissue)별 분별 계수를 계산하는 모델을 만들었다. 그 결과 조류 깃털의 분별계수는 먹이원에 따른 영향을 받지 않으며,  $2.1 \pm 1.5\%$  (평균  $\pm$  표준편차)의 값을 갖는 것으로 나타났으므로, 본 연구에서는 저어새 유조 깃털  $\delta^{13}\text{C}$ 의 평균 값에서  $2.1\%$ 를 뺀 값을  $\bar{\delta}_M$ 으로 사용하였다

$\bar{\delta}_A, \bar{\delta}_B$ 는 먹이원 동위원소의 평균값이며,  $f_A, f_B$ 는 먹이원의 소비자 동위원소에 대한 구성비(proportion)를 나타낸다. 담수 및 해수성 먹이  $\delta^{13}\text{C}$ 의 평균값을 구하기 위해, 국내 연안 및 담수습지에 서식하는 어류 및 저서무척추동물에 대한 안정성 동위원소 연구 중 기존 저어새 채식 연구결과 저어새의 주요 먹이로 알려진 게, 새우, 망둑어과 어류, 미꾸라지 등에 대한  $\delta^{13}\text{C}$ 를 이용하였다(최 2008, 국립수산과학원 2009, 김 2012). 그 결과 해수성 먹이의 평균  $\delta^{13}\text{C}$ 은  $-14.39\% \pm 0.94$  (n=37)으로 나타났으며, 담수성 먹이의 평균  $\delta^{13}\text{C}$ 은  $-26.6\% \pm 1.6$  (n=7)으로 나타났다.

위의 공식을 바탕으로 저어새 유조 먹이 중 담수 및 해수성 먹이원의 비율은 다음 식을 통해 계산되었다.

$$f_A = (\bar{\delta}_M - \bar{\delta}_B) / (\bar{\delta}_A - \bar{\delta}_B)$$

또한 IsoError 1.4 version (Phillips and Gregg 2001)을 이용하여 추정된 먹이원 비율의 표준오차와 95%의 신뢰한계를 구하였다.

## 5. 통계분석

저어새 유조 깃털의 안정성 동위원소비의 연령 및 지역별 변화를 파악하기 위해 선형혼합모형(linear mixed models)을 이용하여 연령, 지역, 연령과 지역간 교호작용 효과에 대하여 분석하였다. 혼합모델은 모형의 설명변수로 임의요인(random effect)가 포함된 통계적 모형으로, 반복 측정된 자료 등에 적용된다(허 2013).

선형혼합모형 분석 결과 지역에 의한 효과가 유의하게 나타날 경우, Bonferroni correction 와 Tukey test 를 이용해 사후검정을 실시하였다. 연령\*지역 교호작용이 유의하게 나타날 경우, 각 지역별로 연령간 동위원소비에 대하여 Paired-t test 를 실시하였다.

모든 조사자료의 통계학적 분석에는 SPSS 20.0 을 사용하였으며 유의수준은 5%로 설정하였다.

## V. 연구 결과

### 1. 번식 현황

2013년 3월에서 7월까지 구지도, 수하암, 남동유수지, 칠산도에서 번식한 저어새는 총 309 쌍으로 확인되었다(Table 4).

구지도 149 쌍이 확인되었으며, 6월 말 조사 시에는 부화 2주 이상 된 둥지가 대부분이었다.

수하암에서 번식한 저어새는 40 쌍으로, 4월 15일에 20 쌍이 포란 중인 것으로 나타났다. 4월 30일까지 새끼가 부화한 둥지가 없었으며, 5월 30일에는 포란 중인 둥지가 9개, 육추 중인 둥지가 21개 확인되었다. 그러나 6월 초 지역 주민의 출입 및 불법적인 알 채취로 인하여 5월말 이후 산란한 둥지는 번식에 실패했으며, 6월 중순에 2쌍이 더 번식을 시도했으나 결국 실패하였다.

남동유수지의 번식 둥지 수는 총 93개로 첫 산란일은 4월 1일이었으며, 6월 초까지 지속적으로 산란 둥지가 증가하였다. 전체 93쌍 중에서 62쌍이 부화에 성공했으며, 60쌍이 이소에 성공하였다.

칠산도에서 번식한 저어새는 총 27 쌍으로, 5월 26일 칠산도에서 번식한 저어새 수는 총 25쌍(이산도 7쌍, 사산도 13쌍, 육산도 5쌍)으로 확인되었다. 번식 둥지 중 23 둥지는 육추 단계였으며 2 둥지는 포란 단계였다. 6월 22일 조사결과 1 둥지가 포란 단계, 7 둥지가 육추 단계였으며, 나머지 둥지는 모두 이소한 상태였다.

**Table 4. The number of observed active nests and the total breeding pair on Guji Island, Suha Islet, Namdong Reservoir, and Chilsan Island in 2013**

| Study area        | Breeding stage | No. of observed active nests |           |          |           |           |          | No. of breeding pairs |
|-------------------|----------------|------------------------------|-----------|----------|-----------|-----------|----------|-----------------------|
|                   |                | Mid Apr.                     | Late Apr. | Late May | Late Jun. | Late July | Mid Aug. |                       |
| Guji Island       |                |                              |           |          | 149       |           |          | 149                   |
| Suha Island       | Incubation     | 20                           | 20        | 9        | 2         |           |          | 40                    |
|                   | Brooding       |                              |           | 21       | 10        |           |          |                       |
|                   | Fledged        |                              |           |          | 14        |           |          |                       |
| Namdong Reservoir | Incubation     | 18                           | 38        | 34       | 8         |           |          | 93                    |
|                   | Brooding       |                              | 10        | 36       | 15        | 8         |          |                       |
|                   | Fledged        |                              |           |          | 45        | 9         | 8        |                       |
| Chilsan Island    | Incubation     |                              |           | 2        | 1         |           |          | 27                    |
|                   | Brooding       |                              |           | 23       | 7         |           |          |                       |
|                   | Fledged        |                              |           |          | 19        |           |          |                       |
| <b>Total</b>      |                |                              |           |          |           |           |          | <b>309</b>            |



## 2. 안정성 동위원소 분석

안정성 동위원소 분석 결과, 탄소 안정성 동위원소비( $\delta^{13}\text{C}$ )의 범위는  $-13.23\sim-23.84\%$ 로 나타났으며, 질소 안정성 동위원소비( $\delta^{15}\text{N}$ )의 범위는  $10.85\sim18.42\%$ 로 나타났다. 지역별 안정성 동위원소비의 분포는 수하암, 남동유수지, 칠산도의 경우  $\delta^{13}\text{C}$ 와  $\delta^{15}\text{N}$  모두 넓은 범위에 걸쳐 겹쳐지는 것으로 나타났다. 반면 구지도의  $\delta^{13}\text{C}$ 와  $\delta^{15}\text{N}$  모두 다른 지역에 비해 낮게 나타나, 분리된 집단으로 나타났다(Fig. 2).

깃털의  $\delta^{13}\text{C}$ 는  $-19\sim-14\%$  사이가 가장 많이 나타났으나 전체적으로는 고르게 분포하였으며,  $\delta^{15}\text{N}$ 는  $14\sim16\%$  사이에 집중되어 나타났다(Fig. 3, Fig. 4).

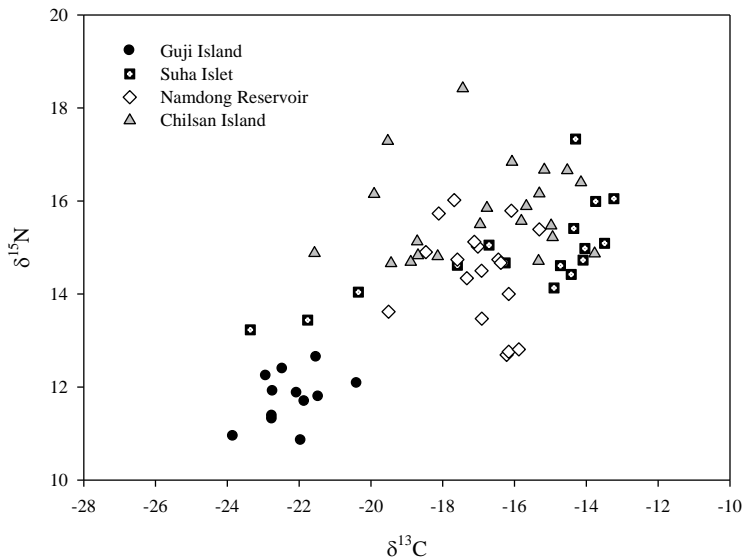


Figure 2. Distribution of the  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  values for the primary feathers of juveniles Black-faced Spoonbills from four different breeding colonies

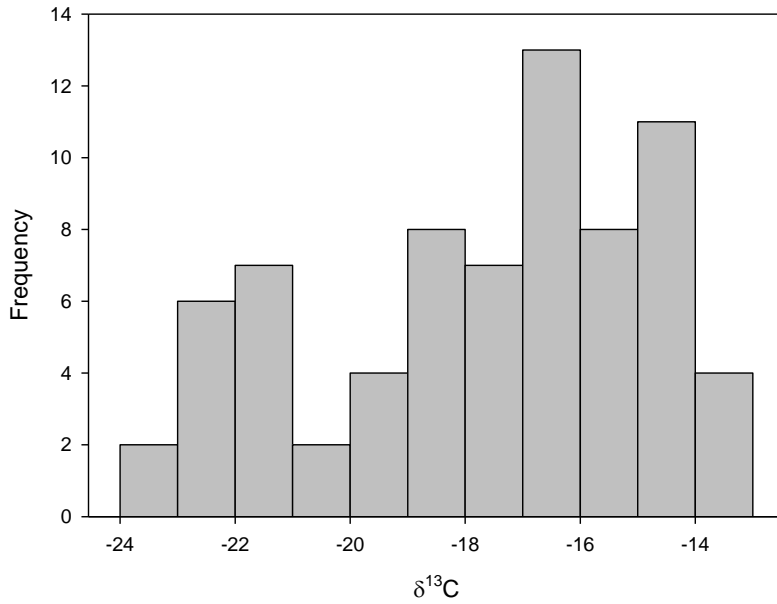


Figure 3. Frequency distribution of the  $\delta^{13}\text{C}$  values for the primary feathers of juvenile Black-faced Spoonbills

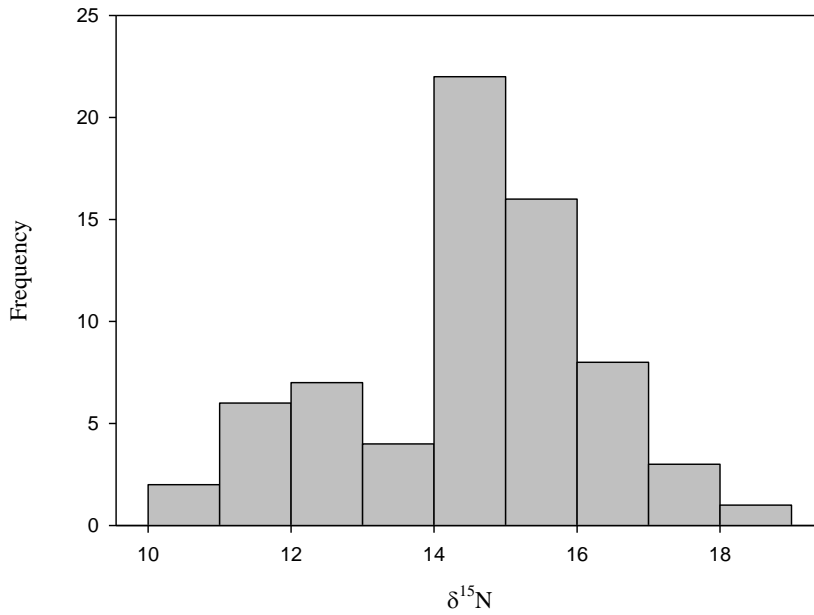


Figure 4. Frequency distribution of the  $\delta^{15}\text{N}$  values for the primary feathers of juvenile Black-faced Spoonbills

## 2.1 탄소 안정성 동위원소의 시공간적 변화

저어새 유조 깃털 탄소 안정성 동위원소비( $\delta^{13}\text{C}$ )는 지역간 유의한 차이를 보였다(linear mixed model; 지역:  $df=3,64$ ,  $F=13.511$ ,  $p<0.001$ ; Fig. 5).  $\delta^{13}\text{C}$ 는 구지도에서 가장 낮게 나타났으며(bonferroni correction,  $p<0.001$ ), 수하암, 남동유수지, 칠산도 간에는 서로 차이를 보이지 않았다( $p>0.05$ , Fig. 5).

연령간  $\delta^{13}\text{C}$  비교 결과, 22 일령의  $\delta^{13}\text{C}$ 가 10 일령에 비해 높게 나타났다(linear mixed model; 연령:  $df=1,64$   $F=5.796$ ,  $p=0.022$ ; Fig. 6).  $\delta^{13}\text{C}$ 의 증가량은 평균 0.72%이며, 지역에 따라 차이를 보이지 않았다(linear mixed model; 연령 x 지역,  $df=1,64$ ,  $F=0.553$ ,  $p=0.908$ ; Fig. 7).

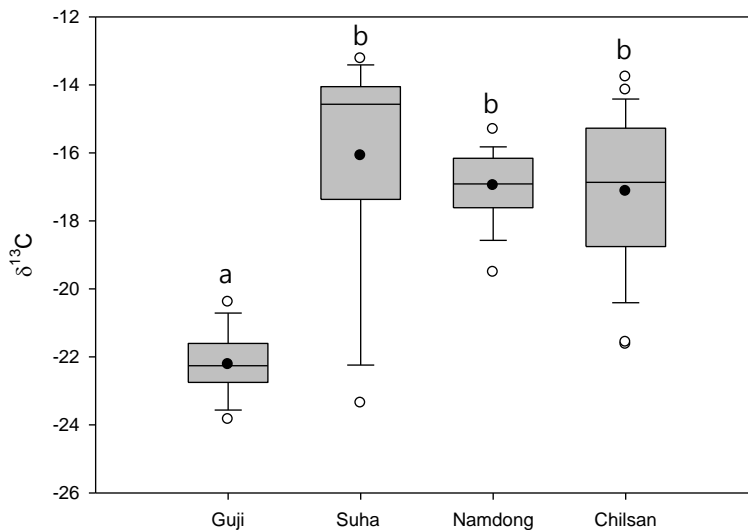


Figure 5. The spatial difference in the  $\delta^{13}\text{C}$  values from the primary feather of juvenile Black-faced spoonbills on Guji Island, Suha Islet, Namdong Reservoir and Chilsan Island.

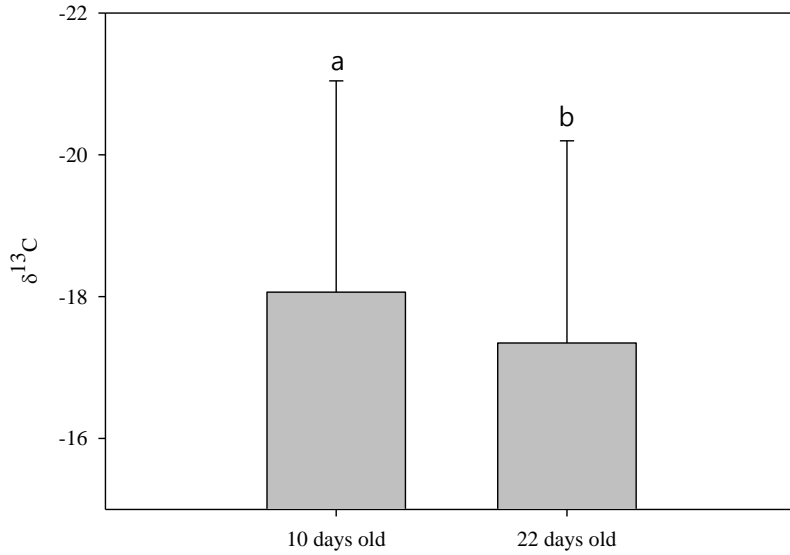


Figure 6. The  $\delta^{13}\text{C}$  values (mean  $\pm$  SD) of the primary feather of juvenile Black-faced Spoonbills grown at 10 days and 22 days old, respectively.

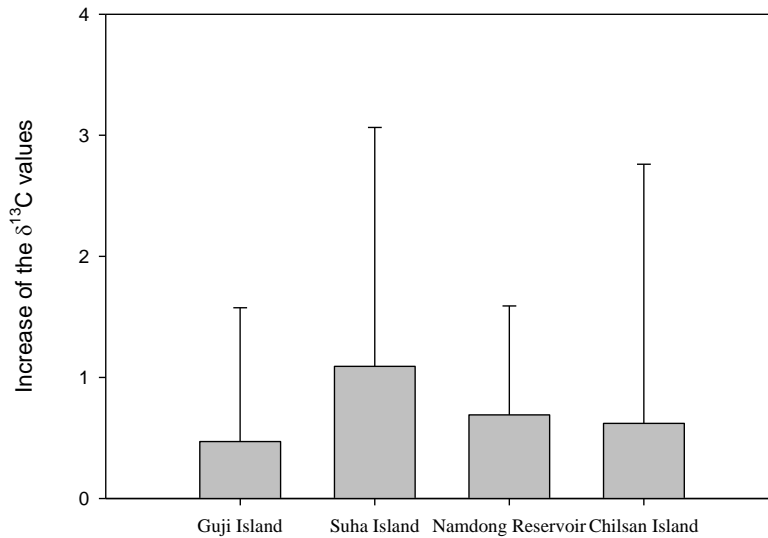


Figure 7. The increase of the  $\delta^{13}\text{C}$  values (mean  $\pm$  SD) in the primary feathers of juvenile Black-faced Spoonbills grown at 10 days and 22 days old, respectively on Guji Island, Suha Islet, Namdong Reservoir and Chilsan Island.

## 2.2 혼합 모델을 이용한 먹이원 비율 추정

저어새 유조 깃털의  $\delta^{13}\text{C}$  에 대해 이원 혼합 모형(two-source isotopic mixing model)을 이용하여 연령 및 지역별 담수성 및 해수성 먹이의 비율을 분석하였다.

지역별 담수성 먹이 비율은 수하암(10 일령 36%, 22 일령 27%), 남동유수지(10 일령 43%, 22 일령 36%), 칠산도(10 일령 43%, 22 일령 38%)에서 비슷한 경향을 보였으나, 구지도(10 일령 84%, 22 일령 80%)에서는 담수성 먹이 비율이 다른 지역에 비해 40% 이상 높은 것으로 나타났다.

연령별 먹이 비율의 경우, 구지도, 수하암, 남동유수지, 칠산도에 서 모두 10 일령에 비해 22 일령에서 담수성 먹이 비율이 감소하고, 해수성 먹이 비율이 증가하는 것으로 나타났다. 담수성 먹이의 감소율 및 해수성 먹이의 증가율은 구지도 3.85%, 수하암 8.93%, 남동유수지 6.72%, 칠산도 5.08% 로 나타났다(Table 5).

**Table 5. Estimated proportion of freshwater and marine foods in the diet of young Black-faced Spoonbills around 10 days old and 22 days old on Guji Island, Suha Islet, Namdong Reservoir and Chilsan Island derived from two-source  $\delta^{13}\text{C}$  diet mixing model**

| $\delta^{13}\text{C}$ two-source mixing model |             |                     |                 |    |
|---|-------------|---------------------|-----------------|----|
|   | Age         | Freshwater [%] (SE) | Marine [%] (SE) | N  |
| Total   | 10 days old | 48.32 (4.88)        | 51.68 (4.88)    | 36 |
|   | 22 days old | 43.24(4.56)         | 56.76 (4.56)    | 36 |
| Guji Island                                   | 10 days old | 83.78 (5.00)        | 16.22 (5.00)    | 6  |
|   | 22 days old | 79.93 (5.08)        | 20.07 (5.08)    | 6  |
| Suha Islet                                    | 10 days old | 36.04 (11.23)       | 63.96 (11.23)   | 8  |
|   | 22 days old | 27.11 (7.11)        | 72.89 (7.11)    | 8  |
| Namdong Reservoir                             | 10 days old | 42.67 (3.77)        | 57.33 (3.77)    | 9  |
|   | 22 days old | 35.95 (3.12)        | 64.05 (3.12)    | 9  |
| Chilsan Island                                | 10 days old | 42.67 (5.68)        | 57.33 (5.68)    | 13 |
|   | 22 days old | 37.59 (5.84)        | 62.41 (5.84)    | 13 |

## 2.3 질소 안정성 동위원소의 시공간적 변화

저어새 유조 깃털 질소 안정성 동위원소( $\delta^{15}\text{N}$ )는 지역간 유의한 차이를 나타냈다(linear mixed model; 지역,  $df=3,64$ ,  $F=31.142$ ,  $p<0.001$ ; Fig. 8). 지역별  $\delta^{15}\text{N}$  는 칠산도에서 가장 높게 나타났으며(tukey test,  $p<0.05$ ), 구지도는 다른 세 지역에 비해 낮은 값을 나타냈다( $p<0.001$ , Fig. 8)

연령별  $\delta^{15}\text{N}$ 는 유의한 차이를 보이지 않았으나, 연령과 지역간 교호작용이 유의하게 나타났다(linear mixed model; 연령,  $df=1,64$ ,  $F=0.677$ ,  $p=0.417$ ; 연령 x 지역  $df=1,64$ ,  $F=3.107$ ,  $p=0.041$ ; Fig. 9-10).

연령별  $\delta^{15}\text{N}$ 의 변화는 칠산도에서만 22 일령의  $\delta^{15}\text{N}$ 가 10 일령에 비해 높게 나타났으며(paired-t test;  $t=2.298$ ,  $p=0.047$ ), 구지도, 수하암, 남동유수지에서는 유의한 차이를 보이지 않았다(구지도:  $t=-0.438$ ,  $p=0.680$ ; 수하암:  $t=-0.055$ ,  $p=0.958$ ; 남동유수지:  $t=-1.233$ ,  $p=0.253$ ; Fig. 10)

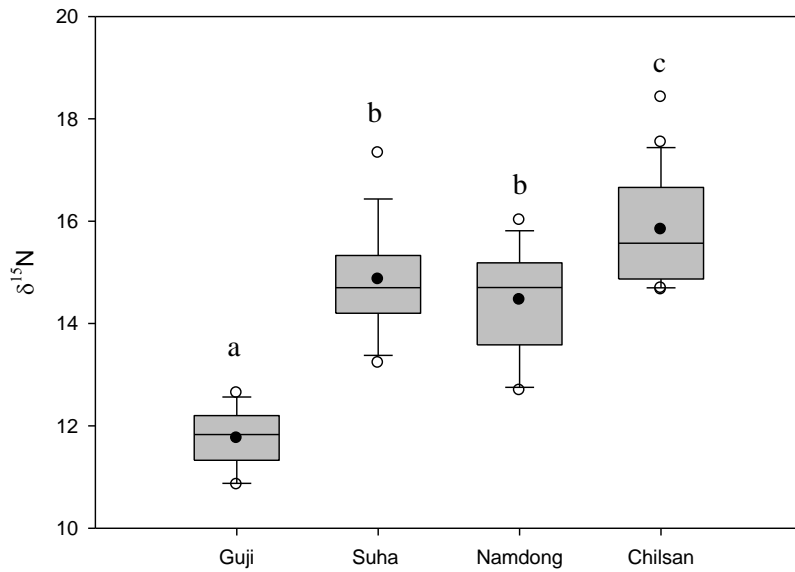


Figure 8. The spatial difference in the  $\delta^{15}\text{N}$  values from the primary feathers of juvenile Black-faced Spoonbills on Guji Island, Suha Islet, Namdong Reservoir and Chilsan Island

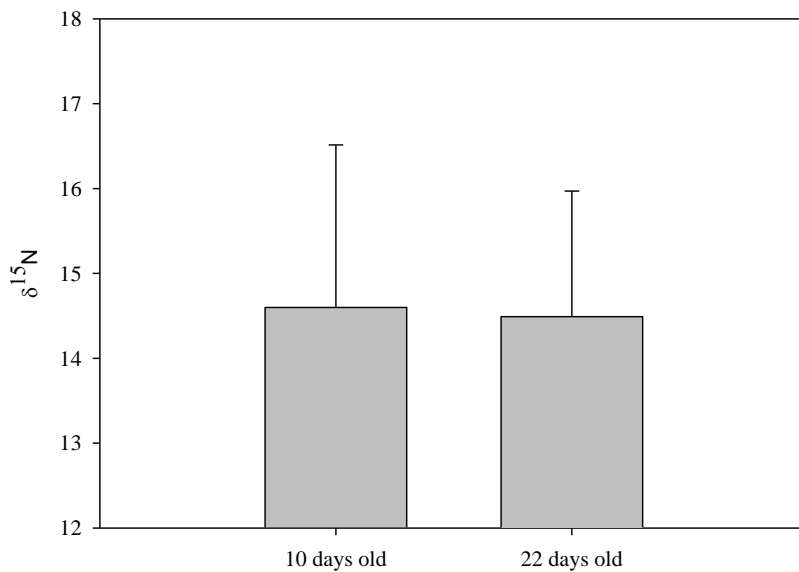


Figure 9. The  $\delta^{15}\text{N}$  values (mean  $\pm$  SD) of the primary feather of juvenile Black-faced Spoonbills grown at 10 days and 22 days old, respectively.



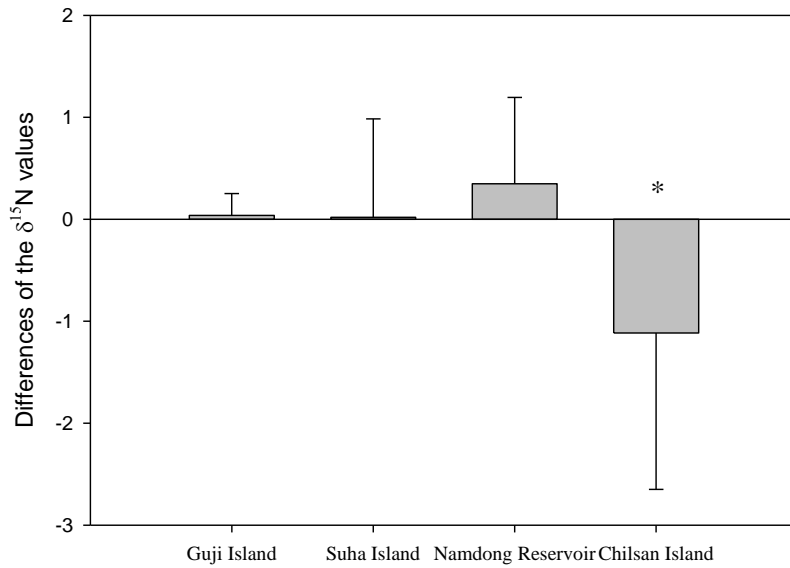


Figure 10. The temporal changes in the  $\delta^{15}\text{N}$  values (mean  $\pm$  SD) between the primary feathers of juvenile Black-faced Spoonbills grown at 10 days and 22 days old, respectively.

## VI. 고 찰

### 1. 번식 현황

저어새 번식 현황 조사 결과, 주로 4 월 중순에서부터 산란을 시작하여 6 월말에 대부분의 번식이 끝났으며 각 지역별 번식 쌍 수는 구지도 약 149 쌍, 수하암 40 쌍, 남동유수지 93 쌍, 칠산도 27 쌍, 총 309 쌍으로 확인되었다. 이는 전체 저어새 생존 개체수 2,725 마리의 1.98-10.94%를 차지하는 것으로서, 람사르 협약에서 정해진 국제적으로 중요한 습지의 기준인 물새의 한 종의 1% 이상을 정기적으로 부양한다는 기준을 상회하므로 네 지역 모두 저어새 보전에 있어 국제적으로 중요한 지역으로 평가할 수 있다.

과거 번식 현황 조사 결과에 따르면 네 번식지 모두 번식 개체군이 지속적으로 증가하는 추세를 보이고 있으며(권 등 2011, 문화재청 2011) 본 연구 결과 역시 최근 조사된 번식 쌍 수와 유사하거나 증가한 것으로 나타났다. 이러한 번식 개체군의 증가는 우선 최근 20 년 동안의 전체 개체군의 지속적인 증가(Yu *et al.* 2013)와 수하암 및 남동유수지에서 시민 단체에 의한 둥지터 조성 및 둥지 재료 공급 등의 지속적인 번식지 관리(남 2011)에 따른 결과로 생각된다.

집단으로 번식하는 물새류의 경우 특히 인간의 간섭에 취약하며(Carney and Sydeman 1999), 간섭은 포식의 증가 및 번식 포기 등을 일으킬 수 있다(Kury and Gochfeld 1975, Tremblay and

Ellison 1979, Anderson and Keith 1980). 저어새 역시 과거 번식했던 용진군 수리봉과 중국 요령지방에서 인위적 교란에 의해 번식이 중단되었던 것을 감안할 때(Wei *et al.* 2005, 한국환경생태연구소 2010) 저어새 역시 인간의 간섭에 취약한 것으로 생각된다. 비록 본 연구 대상지에서는 지속적으로 번식 개체군이 증가하는 것으로 나타났으나, 칠산도를 제외한 다른 번식지가 보호지역으로 지정되어 있지 않으며, 수하암에서의 도란행위(불법적인 알 채취)로 인한 번식 실패는 앞으로 번식지에 대한 관리가 필요함을 보여주는 것으로 생각된다. 따라서 구지도, 수하암, 남동유수지에 대한 법적 보호지역 설정이 선행되어야 하며, 번식기 동안 사람의 출입 등 교란 요인에 대한 통제 조치가 필요할 것으로 판단된다. 특히 수하암의 경우 300m 거리에 영종도 준설토 투기장 건설계획이 진행되고 있어, 수하암에서 번식하는 개체군에게 추가적인 위협요인이 될 것으로 예상되므로, 법적 보호지역 지정 및 관리에 있어 우선적으로 고려되어야 할 것이다.

## 2. 저어새 유조의 담수 및 해수성 먹이원 비율

안정성 동위원소 분석을 이용한 먹이원 연구는 구토물, 위장분석 등의 방법과 달리 개체 내 동화된 먹이에 대한 정보를 얻을 수 있으며, 장기간 동안의 채식 습성을 파악할 수 있다는 장점을 가지고 있다(Hobson *et al.* 1994, Bearhop *et al.* 2002). 특히 탄소 안정성 동위원소( $\delta^{13}\text{C}$ )의 경우 담수성 생물보다 해수성 생물이 높은 값을 가지기 때문에(Chisholm *et al.* 1982, Fry *et al.* 1983), 채식지 또는 먹이원의 기원 파악을 위해 이용되고 있다(Inger *et al.* 2006, McLellan and Shutler 2009, Steenweg *et al.* 2011).

본 연구에서는 저어새 유조의 염분 조절 능력이 불완전할 것이라는 가설을 바탕으로 저어새가 번식지 저어새 유조에게 있어 담수성 먹이의 중요성을 파악하기 위하여 유조 깃털의  $\delta^{13}\text{C}$  을 분석하였다. 그 결과 구지도, 수하암, 남동유수지, 칠산도 네 지역 모두에서 저어새가 유조에게 해수성 먹이뿐만 아니라 담수성 먹이도 함께 급이하는 것으로 나타났다. 연구지역 모두 갯벌이 발달한 해안 및 연안에 위치한 무인도서로서 담수역에 비하여 기수 및 해수역 채식지가 가까운 거리에 위치하고 있기 때문에, 저어새는 유조에게 담수성 먹이를 급이하기 위해 의도적으로 보다 먼 거리를 이동했을 것으로 생각된다. 특히 구지도는 육지로부터 20km 이상 떨어져 있어 네 번식지 중 담수 습지가 가장 멀리 떨어져 있음에도 불구하고 담수성 먹이의 비율이 약 80%로 유조 먹이원의 대부분을 담수습지에 의존하는 것으로 나타났다. 이는 육지로부터 19km 정도 떨어진 인천광역시 옹진군 석도(북위 37° 35' 동경 125° 57')

와 비도(북위 37° 36' 동경 125° 58') 번식지에서 구토물을 분석한 것과 유사한 결과이다(김 등 2001). 해안에서 번식하지만 유조의 염선이 불완전한 것으로 알려진 미국흰따오기, Laughing gull의 경우에는 30km 이상 떨어진 담수습지를 채식지로 이용한다는 것이 보고된 바 있다(Dosch 1997, John and Bildstein 1997). 비록 저어새과에 속하는 미국흰따오기나 Roseate Spoonbill (*Platalea ajaja*)의 경우 약 40km/h 이상의 속도로 비행하기 때문에 (Pennycuick 1997), 채식지까지의 거리가 증가하더라도 이동 시간의 증가는 적을 것으로 생각되지만, 비행 거리가 길어질수록 에너지 소모는 크게 증가한다는 것으로 알려져 있다(Pennycuick and DeSanto 1989, DeSanto *et al.* 1997). 따라서 구지도를 포함한 네 번식지 모두 담수 습지까지 이동하기 위해서는 많은 에너지와 시간을 소비해야 함에도 불구하고, 담수성 먹이를 이용하는 것은 유조에게 담수성 먹이가 중요한 먹이자원임을 나타내며, 또한 저어새 유조의 염선이 불완전할 가능성을 보여주는 결과로 생각된다.

연령간  $\delta^{13}\text{C}$  를 비교한 결과에서는 네 대상지에서 모두 22 일령의  $\delta^{13}\text{C}$  가 10 일령에 비해 약 6‰ 높게 나타나 유조가 성장할수록 담수성 먹이원의 비율이 감소했음 보였으며, 이는 기존 인천광역시 용진군의 유도(북위 37° 46', 동경 126° 32') 번식개체군에 대한 채식지 이용 연구에서 확인된 내용과도 유사한 결과이다(김 2006). 일반적으로 저어새가 특정 먹이자원에 의존하기 보다 다양한 먹이자원을 비선택적으로 이용하는 것으로(Swennen and Yu 2005) 알려져 있는 것과는 달리 이러한 네 대상지에서 동일하게 나타난 부화 초기 높은 담수성 먹이원의 비율은 부화 초기의 저어새 유조에게 있어 담수성 먹이가 중요하기 때문으로 생각된다. 또한 미국흰따

오기의 유조의 경우 5 일령부터 염선을 통해 염분을 배출하며, 수리 갈매기와 Laughing gull 등에서 유조가 성장할수록 염선의 기능이 발달한다는 결과와 관련이 있는 것으로 생각된다(DeSanto and Bildstein unpublished data, Hughes *et al.* 1987, Dosch 1997). 따라서 저어새 유조의 연령에 따른 담수성 먹이 비율의 감소는 유조의 염선이 성장에 따라 성조에게 더 많은 비행거리를 요구하는 담수성 먹이의 의존성이 낮아질 것이라는 가설을 지지하는 결과로 생각된다. 그러나 수하암, 남동유수지, 칠산도의 번식 개체군이 구지도보다 담수습지까지의 거리가 가까움에도 불구하고 담수성 먹이를 낮은 비율로 이용하는 원인에 대한 추가적인 조사가 필요할 것으로 생각된다. 또한 이러한 담수성 먹이원 비율 차이로 인한 유조 성장을 및 번식 성공률의 비교를 통해 저어새 유조의 내염성을 보다 정확하게 파악할 수 있을 것으로 생각된다.

### 3. 질소 안정성 동위원소비의 시공간적 변화

질소 안정성 동위원소( $\delta^{15}\text{N}$ )는 생물의 영양단계가 높아짐에 따라 2-4%씩 증가하며, 소형 어류 및 갑각류의 경우에는 크기 및 연령에 따라서도  $\delta^{15}\text{N}$  가 증가하는 것으로 알려져 있다(DeNiro and Epstein 1981, Jennings *et al.* 2002).

본 연구에서는 성조가 육추기 동안 유조의 성장 및 에너지 요구량의 증가에 맞춰 보다 큰 먹이 또는 높은 영양단계의 먹이를 이용한다는 기존의 연구 결과(Moser 1986, Kloskowski 2004, Hampl *et al.* 2005)를 바탕으로, 지역간 먹이원 이용에는 차이가 있을지라도 저어새 유조의 성장에 따라  $\delta^{15}\text{N}$  가 증가할 것으로 예측하였으며, 이에 대해  $\delta^{15}\text{N}$  의 분석을 통하여 저어새 유조 먹이 영양단계의 지역 및 연령별 차이를 파악하고자 하였다. 그 결과, 칠산도(15.84%), 수하암(14.86%) 및 남동유수지(14.46%), 구지도(11.76%)의 세 지역에 따라 주요 먹이원의  $\delta^{15}\text{N}$  가 다른 것으로 나타났다. 이러한 결과는 지역간 저어새가 유조에게 급이하는 먹이원의 영양단계의 차이로 인한 결과일 수도 있으나, 기존 주요 먹이원으로 알려진 어류와 갑각류(Swennen and Yu 2005, Ueng *et al.* 2007) 간  $\delta^{15}\text{N}$  의 차이가 약 2% 인 것에 비하여 큰 차이를 보여, 지역간  $\delta^{15}\text{N}$  의 차이에 미치는 추가적인 요인이 있는 것으로 생각된다.

생물의  $\delta^{15}\text{N}$  는 먹이원 영양단계를 반영하지만 질소 오염원에 노출 될 경우 자연 상태보다 높은  $\delta^{15}\text{N}$  를 나타내는 것으로 알려져 있다(Chang *et al.* 2003, Anderson and Cabana 2005). 특히 저어새의 주요 채식지인 하구역 및 갯벌과 농경지는 폐수 및 비료 등

질소 오염원의 영향을 받기 쉬운 지역이며, 오염원에 대한 노출 정도에 따라 같은 영양단계 또는 종 간에서도  $\delta^{15}\text{N}$  가 크게는 10% 이상 차이가 나타나는 것으로 보고되었다(Hebert and Wassenaar 2001, Schlacher *et al.* 2005). 따라서 본 연구 결과 나타난 지역간  $\delta^{15}\text{N}$  의 차이는 지역간 먹이자원의 질소 오염원에 대한 노출 정도의 차이의 결과일 가능성이 높다고 판단된다. 특히  $\delta^{15}\text{N}$  가 가장 높게 나타난 칠산도의 경우에는 성조가 영양단계가 높은 먹이원을 주로 이용했을 수도 있으나 오염원에 가장 많이 노출되었던 가능성이 높은 것으로 생각된다. 반면 구지도의 경우, 다른 지역에 비해 낮은 영양단계의 먹이원을 주로 이용하였거나, 채식지로의 질소 오염 수준이 가장 적었을 것으로 생각된다.

연령간 비교 결과 구지도, 수하암, 남동유수지에서는 유조의 연령에 따른  $\delta^{15}\text{N}$  변화는 나타나지 않았으나, 칠산도에서는 10 일령의  $\delta^{15}\text{N}$ (16.39‰)가 22 일령(15.41‰) 보다 높은 값을 보였다. 그러나 저어새의 주요 먹이원 중 하나인 갑각류의 경우 대사율이 대형 동물에 비해 빠르기 때문에 오염원의 유입될 경우 단기간에  $\delta^{15}\text{N}$  가 증가하기 때문에(Peterson 1999), 시기별 오염원 노출 정도도 저어새 유조  $\delta^{15}\text{N}$  에 영향을 미칠 수 있었을 것으로 생각된다. 따라서 연령간  $\delta^{15}\text{N}$  의 차이를 보이지 않은 구지도, 수하암, 남동유수지에서는 유조의 연령에 관계없이 유사한 영양단계의 먹이를 급이했거나, 오염원 노출 정도가 시기에 관계없이 유사했을 것으로 생각된다. 시간이 지남에 따라  $\delta^{15}\text{N}$  가 증가한 것으로 나타난 칠산도의 경우는 성조가 유조가 성장할수록 낮은 영양단계의 먹이를 급이하였거나, 아니면 부화 초에 일시적인 오염원의 유입이 발생하였을 것으로 생각된다.

본 연구 결과 저어새 유조의  $\delta^{15}\text{N}$  는 지역간 차이를 보였으며, 연령간 비교의 경우 칠산도에서만 감소하는 경향을 나타냈으나, 이



러한 차이는 먹이원의 영양단계뿐만 아니라 인위적인 질소 오염원에 대한 노출 정도의 차이로 인한 것으로 생각된다. 실제 전라남도의 유기비료 사용 농가수 및 논벼 면적은 인천의 12-14 배에 달하며(유기비료 사용 농가수: 인천 6,826가구, 전남 97,160가구; 유기비료 사용 논벼 면적: 인천 9,714ha, 전남 121,466ha; 2010 농림어업총조사, 통계청 미발표자료), 수계로 방류되는 유기물질부하량은 전라남도에서 2,936kg/일로서 인천의 1,187kg/일보다 높게 나타났다(국립환경과학원 2010). 따라서 칠산도의 변식집단이 인천의 수하암과 남동유수지 집단에 비해 담수생태계로 유입된 질소 오염원에 더 노출될 가능성이 높은 것으로 보이며, 특히 저어새의 변식초기에 논 생태계에서의 채식활동 시기와 모내기를 위한 질소 비료 사용 시기가 겹치는 점이 칠산도 집단에서  $\delta^{15}\text{N}$ 의 일시적인 증가를 유발했을 것으로 추측된다. 반면 북한 지역의 담수 수계를 이용하는 구지도 변식집단의  $\delta^{15}\text{N}$ 이 가장 낮은 것은 북한의 경제 사정이 나빠짐에 따라 비료 사용량이 감소한 현상(Kim 1999)과도 관련이 있을 것으로 추정된다. 따라서 향후 저어새 먹이원  $\delta^{15}\text{N}$ 의 지역간 차이에 영향을 미치는 요인을 정확한 파악을 위해서는 각 지역별 먹이원에 대한  $\delta^{15}\text{N}$  분석과 함께 오염원의 종류 및 노출 정도에 대한 구체적인 조사가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

## VII. 종합 고찰 및 관리 방안

한 생물종의 보전을 위한 서식지의 보호 및 관리는 해당 종의 서식지 이용 등에 대한 생태적 정보를 바탕으로 이루어져야 한다 (Goldsmith 1991). 저어새는 전체 개체군이 2,725 마리에 불과한 국제적인 멸종위기종이며 (Yu *et al.* 2013), 주요 번식지인 한번도 서해안 지역의 간척 및 갯벌이 빠르게 소실 되고 있다 (Chan *et al.* 2010). 그럼에도 불구하고 저어새에 대한 보호 및 관리방안을 마련하는 근거가 될 번식 생태에 대한 연구는 여전히 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 구지도, 수하암, 남동유수지, 칠산도 등 네 지역에서 번식하는 저어새를 대상으로 번식 현황 조사와 안정성 동위원소를 이용한 먹이원 분석을 통해 각 대상지의 번식 현황과 번식지 저어새의 채식 습성에 대하여 파악하고자 하였다. 또한 이를 바탕으로 번식지 저어새 서식지의 보전을 위한 관리방안을 제시하고자 하였다.

본 연구를 통해 확인된 각 대상지별 번식 쌍 수는 구지도 149 쌍, 수하암 40 쌍, 남동유수지, 93 쌍, 칠산도 27 쌍으로서 총 309 쌍이 번식한 것으로 나타났다. 이는 전체 저어새 생존 개체군인 2,725 개체의 22.67% 이상을 차지하는 것이다. 이들 지역은 각각 멸종위기종인 저어새 전체 개체군의 2% 이상이 정기적으로 번식하는 지역으로, 람사르 협약에서 규정한 국제적으로 중요한 습지의 기준을 상회하는 것으로 나타났다. 따라서 네 지역에서의 안정적인 번식 및 위해 번식지 및 주변 주요 서식지에 대한 보전 및 관리가 이뤄져야 할 것이다. 그러나 칠산도를 제외한 구지도, 수하암, 남동유수지의

경우 법적 보호지역으로 지정되어 있지 않아, 시민 단체 및 연구자들에 의한 번식 현황 조사 및 번식지 관리가 제한적으로만 이뤄지고 있을 뿐 번식지 개발 및 사람의 출입 등의 교란 요인을 통제할 수 없는 상황이다. 따라서 각 번식지의 보호지역 지정이 우선적으로 시행되어야 하며, 이후 시민 단체 및 연구자들과 정부 기관, 지역 주민과의 협력을 통한 체계적인 관리가 이뤄져야 할 것이다.

특히 수하암은 간조 시 갯벌을 통해 사람의 출입이 가능하며, 150m 거리에 2013년부터 2016년까지 습지생태공원 및 녹지완충지역과 준설토 투기장이 지어질 예정으로 이에 따른 교란 가능성이 가장 높을 것으로 생각된다. 따라서 보호지역 지정에 있어 수하암이 우선적으로 고려되어야 하며, 공사 시기 제한 등의 교란을 최소화할 수 있는 방안의 마련이 필요하다. 또한 조사 중 발생한 도란행위는 저어새에 대한 잘못된 정보 및 인식 부족으로 일어난 것으로 앞으로 지역 주민을 대상으로 한 교육 및 홍보가 이뤄져야 할 것으로 생각된다.

남동유수지의 경우 도심 주변에 위치하지만 번식지로의 접근이 어려우며, 시민 단체에 의한 모니터링이 지속적으로 이뤄지고 있어 사람에 의한 직접적인 교란 가능성은 적을 것으로 생각된다. 그러나 강우 시 수위 상승으로 인해 둥지가 침수될 위험이 있으며, 유기물과 영양염류에 의한 오염이 심각하여(함 등 2007) 보툴리즘 등의 질병 발생과 중독의 가능성이 있으므로 이에 대한 관리가 요구된다.

구지도는 어로 한계선인 NLL 상에 위치하여 사람이 출입이 어려우며, 넓은 면적과 평탄한 지형, 자연 식생으로 인한 둥지 자리 및 재료가 풍부하기 때문에 많은 수의 저어새가 번식할 수 있는 것으로 생각된다. 그러나 조사 시 염소(*Capra hircus*) 3마리가 방목되는 것이 확인되었으며, 이로 인한 식생의 교란이 심각한 것으로 나타났

다. 방목이 방치 될 경우 섬의 식물상 변화 및 식생 훼손으로 인한 저어새 둥지 재료 부족과 직접적인 번식 방해가 발생할 것으로 예상되므로 염소 구제를 통한 식생 관리 및 보호가 요구된다. 또한 향후 특정도서 및 천연기념물 지역 지정을 통한 본 지역의 자연환경에 대한 보전 및 관리가 필요하다고 생각된다.

연령간 탄소 안정성 동위원소 비교 결과 네 대상지에서 모두 22 일령의 탄소 안정성 동위원소가 10 일령에 비해 높게 나타나, 저어새 유조의 담수성 먹이원의 비율이 유조가 성장함에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 먹이 이용 양상의 변화는, 부화 초기 저어새 유조에게 담수성 먹이가 중요함을 나타내며, 미국흰따오기, Laughing Gull, 수리갈매기 등에서 유조의 염선이 부화 후 점진적으로 발달한다는 결과와 관련이 있을 것으로 생각된다(DeSanto and Bildstein unpublished data, Hughes *et al.* 1987, Dosch 1997). 또한 탄소 및 질소 안정성 동위원소 모두 지역간 차이를 보였으며, 탄소 안정성 동위원소의 경우 구지도에서 다른 지역에 비해 특히 낮게 나타나 담수성 먹이에 대한 의존도가 가장 높은 것으로 나타났다. 구지도의 경우 담수습지로부터 약 20km 이상 떨어져 있음에도 불구하고 이러한 높은 담수성 먹이의 비율은 유조에게 있어 담수성 먹이의 중요성을 나타내는 결과로 생각되지만, 다른 지역과의 차이에 대해서는 먹이가용성, 교란 등에 대한 추가적인 조사가 필요할 것으로 생각된다. 또한 각 번식 개체군의 보전을 위해서는 번식 중인 저어새가 주요 채식지로 활용하는 담수 습지와 갯벌을 각 번식 집단 별로 파악하고, 두 가지 채식환경을 함께 보전 및 관리할 필요성이 있다. 그러나 최근 농민과의 마찰 및 차량 통행 등 인위적인 교란의 증가로 인해 주로 이용되는 담수습지인 논외 이용률이 감소한다는 결과가 보고되었다(문화재청 2006). 따라서 저어새가 채식지로 이용하는 지역에서는 농민에 대한 지원 및 홍보와 서식지 관

리 등이 필요할 것으로 생각되며, 특히 담수성 먹이 이용률이 높은 부화 초기인 5 월 초에 담수습지 및 농경지에 대한 집중적인 관리와 지역 농민 등 이해당사자의 협조가 필요할 것으로 생각된다. 이를 위해서는 논에서 채식하는 저어새에 대한 간섭을 저감하고 일부 발생할 수 있는 농민의 피해를 지원해 줄 수 있는 현실적인 대안을 마련해야 하며, 저어새의 주요 채식지에서 생산된 농산물에 대한 저어새의 브랜드화, 유기농 장려 등의 방안을 통해 보전의 당위성과 인식 증진, 경제적 혜택의 가능성을 동시에 높일 필요성이 있다.

저어새의 먹이원인 소형 어류 및 갑각류의 경우 빠른 대사회전을 통하여 질소 오염원 유입 시  $\delta^{15}\text{N}$  가 빠르게 증가하며 (Peterson 1999), 갯벌 및 하구역, 농경지 등이 질소 오염원 유입에 취약한 지역임을 고려할 때 (Hebert and Wassenaar 2001, Schlacher *et al.* 2005) 저어새 유조의  $\delta^{15}\text{N}$  는 먹이원의 영양단계 뿐만 아니라 오염원 노출 정도를 반영하는 것으로 생각된다. 본 연구에서  $\delta^{15}\text{N}$  는 칠산도, 수하암 및 남동유수지, 구지도 순으로 높게 나타났으며, 이는 칠산도의 저어새가 가장 높은 영양단계의 먹이원을 이용했거나 오염원에 노출된 정도가 가장 심했을 것으로 생각된다. 반대로 구지도에서는 낮은 영양단계의 먹이원을 이용했거나 오염원의 영향이 적었을 것으로 판단된다. 또한 칠산도에서만 연령에 따라  $\delta^{15}\text{N}$  가 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 유조의 성장에 따른 먹이원 영양단계의 감소 또는 부화 초기 일시적인 오염원의 유입의 결과로 생각된다. 따라서 담수성 먹이 이용률이 높은 육추 초기에는 저어새가 채식지로 활용하는 논과 담수 습지에서의 질소 오염원 유입을 저감할 수 있도록 유도해야 하며, 이는 중앙정부와 지방자치단체, 농민들의 참여를 통해 수질오염 저감, 고품질의 쌀 생산, 유기농 장려 등의 활동과 연계함으로써 저어새의 질소 오염원에 대한 노출 수준을 낮추는 것이 현실적이고 효율적인 방안이 될 수

있을 것으로 기대된다. 향후 각 번식 개체군에 대하여 질소 오염원을 비롯한 기타 환경오염물질에 대한 노출 및 위협 수준을 구체적으로 파악하여 관리해야 할 것으로 생각된다.

## VIII. 결 론

인천시 구지도, 수하암, 남동유수지, 영광군 칠산도에서 저어새의 번식 현황과 저어새 유조의 지역 및 연령별 담수 및 해수성 먹이 비율과 먹이의 영양단계의 변화에 대한 연구 결과는 다음과 같다.

1. 연구 대상지 별 번식 쌍 수는 구지도 149 쌍, 수하암 40 쌍, 남동유수지 93 쌍, 칠산도 27 쌍, 총 309 으로 확인되었다.
2. 전 연구 대상지에서 담수성 및 해수성 먹이를 함께 이용하며, 유조의 연령에 따라 담수성 먹이의 비율이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 육추 초기의 저어새 유조에게 담수성 먹이가 중요하며, 저어새 유조의 불완전한 염선 발달에 대한 가능성을 보여주는 결과로 생각된다.
3. 지역별 담수성 먹이 비율은 담수 습지의 가용성이 가장 낮은 구지도에서 오히려 가장 높게 나타났으며, 수하암, 남동유수지, 칠산도는 담수성 먹이를 유사한 비율로 이용하는 것으로 나타났다.
4. 저어새 유조 깃털의 질소 안정성 동위원소비는 지역간 큰 차이를 보였으며, 칠산도에서만 유조 연령에 따라 값이 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 먹이의 영양단계뿐만 아니라 인위적 질소 오염원이 영향을 준 것으로 생각된다.
5. 지역별 질소 안정성 동위원소비는 칠산도, 수하암 및 남동유수지, 구지도 순으로 나타났으며, 따라서 칠산도에서 가장 높은

영양단계의 먹이를 이용하거나 오염원의 영향이 가장 높았던 것으로 판단된다.

6. 연령별 질소 안정성 동위원소비는 구지도, 수하암 남동유수지에서는 변화가 없어 시기에 따른 영양단계 및 오염원 노출 정도가 유사했던 것으로 생각되나, 칠산도의 경우 육추 초기에 높은 영양단계를 이용하거나 농사를 위한 비료 사용량 증가 등과 같은 일시적인 오염원의 유입이 있었던 것으로 생각된다.



## IX. 인용문헌

- 권인기, 이기섭. 2011. 인천 경기만 일대의 저어새 번식과 시기에 따른 성공률. 2011 저어새 보전과 네트워크 구축을 위한 국제 심포지엄.
- 국립수산과학원. 2009. 여자만 자원조사. 국립수산과학원.
- 국립환경과학원. 2010. 공장폐수의 발생과 처리. 국립환경과학원.
- 김수일, 이도한. 2001. 저어새. 도요새, 서울.
- 김수일. 2004. 강화갯벌 및 저어새 번식지 모니터링 결과: 2003 년 중점관리 천연기념물 조류서식지 모니터링 결과보고서. 문화재청.
- 김인철. 2006. 한국에서 저어새(*Platalea minor*)의 번식현황과 채식 생태에 관한 연구. 한국교원대학교 석사학위논문.
- 김재욱. 2012. 논외 둠벙이 가지는 생태학적 기능에 관한 연구. 강원대학교 박사학위논문.
- 남선정. 2011. 인천 송도 저어새의 번식현황과 보전활동. 2011 저어새 보전과 네트워크 구축을 위한 국제 심포지엄.
- 문화재청. 2006. 천연기념물 모니터링. 문화재청.
- 문화재청. 2011. 천연기념물(동물) 서식지 등 실태조사 및 효율적 관리방안 마련 연구. 문화재청.
- 원홍구. 1963. 조선조류지 1. 과학원출판사, 평양.

- 이기섭, 노신애, 이종렬 2005. 한국의 저어새 번식지역과 번식생태. 2005. 저어새 국제심포지엄 자료집.
- 이윤경. 2010. 한국 서해에 서식하는 노랑부리백로(*Egretta eulophotes*)의 번식 및 채식 생태. 한국교원대학교 박사학위논문.
- 정종렬. 1998. 우리나라 주요 희귀철새의 생태와 보호에 대한 연구. 김일성종합대학 박사학위논문.
- 조향수. 2010. 한국의 번식기 저어새(*Platalea minor*) 보전을 위한 대체서식지 조성 모형 개발. 서울대학교 석사학위논문.
- 최은정. 2008. 안정동위원소기법을 이용한 낙동강 하구역의 먹이망 구조. 부산대학교 박사학위논문.
- 최창용. 2004. 제주도 성산포에 도래하는 저어새(*Platalea minor*)의 월동생태 및 관리방안. 서울대학교 석사학위논문.
- 한국환경생태연구소. 2010. 저어새와 두루미의 서식분포, 개체군 동태 및 보호방안 수립 연구 최종 보고서. 국립생물자원관.
- 함창학, 김기형. 2007. 승기천과 연계된 남동유수지 환경개선 및 유지관리 방안 연구. 인천지역환경기술센터.
- 허명희. 2013. SPSS Statistics 고급선형모형(증보판). (주)데이터솔루션, 서울.
- 환경부. 2006. 습지보호지역으로 지정.고시. 환경부고시 제 2006-58 호.
- Anderson, C. and G. Cabana. 2005.  $\delta^{15}\text{N}$  in riverine food webs: effects of N inputs from agricultural watersheds. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 62: 333-340.

- Anderson, D. W. and J. O. Keith. 1980. The human influence on seabird nesting success: conservation implications. *Biological Conservation* 18: 65-80.
- Bearhop, S., D. R. Thompson, S. Waldron, I. C. Russell, G. Alexander and R. W. Furness. 1999. Stable isotopes indicate the extent of freshwater feeding by cormorants *Phalacrocorax carbo* shot at inland fisheries in England. *Journal of Applied Ecology* 36: 75-84.
- Bearhop, S., S. Waldron, S. C. Votier and R. W. Furness. 2002. Factors that influence assimilation rates on fractionation of nitrogen and carbon stable isotope in avian blood and feathers. *Physiological and Biochemical Zoology* 75: 451-458.
- Ben-David, M. and D. M. Schell. 2001. Mixing models in analyses of diet using multiple stable isotopes: a response. *Oecologia* 127: 180-184.
- Bildstein, K. L. 1990. Status, Conservation and management of the scarlet ibis *Eudocimus ruber* in the Caroni Swamp, Trinidad, West Indies. *Biological Conservation* 54: 61-78.
- Bildstein, K. L., W. Post, J. Johnston and P. Frederick. 1990. Freshwater wetlands, rainfall, and the breeding ecology of white ibises in Coastal South Carolina. *Wilson Bulletin* 102: 84-98.
- BirdLife International. 2001. Threatened birds of Asia: the BirdLife International Red Data Book. BirdLife International. Cambridge.
- Bocher, P., Y. Cherel and K. A. Hobson. 2000. Complete trophic segregation between South Georgian and common diving petrels during breeding at Iles Kerguelen. *Marine Ecology Progress Series* 208: 249-264.
- Burger, J. and M. Gochfeld. 1984. Seasonal variation in size and function of the nasal salt gland of the Franklin's gull (*Larus pipixcan*). *Comparative Biochemistry and Physiology* 77: 103-110.

- Carney, K. M. and W. J. Sydeman. 1999. A Review of human disturbance effects on nesting colonial waterbirds. *Waterbirds* 22: 68-79.
- Caut, S., E. Angulo and F. Courchamp. 2009. Variation in discrimination factors ( $\Delta^{15}\text{N}$  and  $\Delta^{13}\text{C}$ ): the effect of diet isotopic values and applications for diet reconstruction. *Journal of Applied Ecology* 46: 443-453.
- Chan, S., W. H. Fang, K. S. Lee, Y. Yamada and Y. T. Yu. 2010. International single species action plan for the conservation of the black-faced spoonbill (*Platalea minor*). BirdLife International Asia Division, Tokyo, Japan; CMS Secretariat, Bonn, Germany.
- Chang, C. Y., C. Kendall, S. T. Silva, W. A. Battaglin and D. H Campbell. 2003. Nitrate stable isotopes: tools for determining nitrate sources among different land uses in the Mississippi River Basin. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science* 59: 1874-1885.
- Cheng, W. H., T. F. Kuo, D. N. Lee and C. F. Weng. 2006. Sex identification of the black-faced spoonbill (*Platalea minor*). *Zoological Studies* 45: 104-113.
- Cherel, Y., K. A. Hobson and H. Weimerskirch. 2000. Using stable-isotope analysis of feathers to distinguish moulting and breeding origins of seabirds. *Oecologia* 122: 155-162.
- Chisholm, C. S., D. E. Nelson and H. P. Schwaritz. 1982. Stable-carbon isotope ratios as a measure of marine versus terrestrial protein in ancient diets. *Science* 216: 1131-1132.
- Chong, J. R., I. Tsuchiya and H. Sugita. 2000. Captive breeding of black-faced spoonbills. In: Ueta, M., R. Kurosawa and D. Allen (eds) *Conservation and Research of Black-faced Spoonbills and Their Habitats*. pp. 47-53. Wild Bird Society of Japan, Tokyo, Japan.
- Chong, J. R., U. I. Pak, C. Y. Rim and T. S. Kim. 1996. Breeding biology of black-faced spoonbill *Platalea minor*. *Strix* 14: 1-10.
- Craig, H. 1953. The geochemistry of stable carbon isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 3: 53-92.

- DeNiro, M. J. and S. Epstein. 1978. Influence of diet on the distribution on of carbon isotopes in animals. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 42: 495-506.
- DeNiro, M. J. and S. Epstein. 1981. Influence of diet on the distribution on of nitrogen isotopes in animals. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 45: 341-351.
- DeSanto, T. L., J. W. Johnston and K. L. Bildstein. 1997. Wetland feeding site use by white ibises (*Eudocimus albus*) breeding in Coastal South Carolina. *Journal of the Colonial Waterbird Society* 20: 167-176.
- Dosch, J. J. 1997. Salt tolerance of nestling laughing gulls: an experimental field investigation. *Colonial Waterbirds* 20: 449-457.
- Dosch, J. J. 2003. Movement patterns of adult laughing gulls *Larus atricilla* during the nesting season. *Ornithologica* 38: 15-25.
- El-Hacen, M. E. 2010. Temporal and spatial variation in the diet of breeding spoonbills on Schiermonnikoog: a stable isotopes approach. University of Groningen.
- Forero, M. G., J. Gonzalez-Solis, K. A. Hobson, J. A. Donazar, M. Bertellotti, G. Blanco and G. R. Bortolotti. 2005. Stable isotopes reveal trophic segregation by sex and age in the southern giant petrel in two different food webs. *Marine Ecology Progress Series* 296: 107-113.
- Fry, B. 2006. *Stable Isotope Ecology*. Springer, New York, NY.
- Fry, B., R. S. Scalan and P. L. Parker. 1983.  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratios in marine food webs of the Torres Strait, Queensland. *Journal of Australian Marine and Freshwater Research* 23: 707-715.
- Goldsmith, B. 1991. *Monitoring for conservation an ecology*. Chapman and Hall. New York.
- Hancock, J. A., J. A. Kushlan and M. P. Kahl. 1992. *Storks, ibises and spoonbills of the world*. Academic Press, London, United Kingdom.

- Hامل, R., S. Bures, P. Balaz, M. Bobek and F. Pojer. 2005. Food provisioning and nestling diet of the black stork in the Czech Republic. *Waterbirds* 28: 35-40.
- Heaton, T. H. E. 1986. Isotopic studies of nitrogen pollution on the hydrosphere and atmosphere: a review. *Chemical Geology* 59: 87-102.
- Hebert, C. E. and L. I. Wassenaar. 2001. Stable nitrogen isotopes in waterfowl feathers reflect agricultural land use in Western Canada. *Environmental Science and Technology* 35: 3482-3487.
- Hobson, K. A. 1990. Stable isotope analysis of marbled murrelets: evidence for freshwater feeding and determination of trophic level. *Condor* 92: 897-903.
- Hobson, K. A. and H. E. Welck. 1995. Cannibalism and trophic structure in a high Arctic lake: insights from stable isotope analysis. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science* 52: 1195-1201.
- Hobson, K. A., J. F. Piatt and J. Pitocchelli. 1994. Using stable isotopes to determine seabird trophic relationships. *Journal of Animal Ecology* 63: 786-798.
- Hobson, K. A. and R. G. Clark. 1992. Assessing avian diets using stable isotopes I : turnover of  $^{13}\text{C}$  in tissues. *Condor* 94: 181-188.
- Hobson, K. A. and H. E. Welch. 1992. Determination of trophic relationships within a high Arctic marine food web using  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  analysis. *Marine Ecology Progress Series* 84: 9-18.
- Holmes, W. N. and J. G. Phillips. 1985. The avian salt gland. *Biological Reviews* 60: 213-256.
- Hughes, M. R., R. R. Julie and B. R. Thomas. 1987. Total body water and its turnover in free-living nestling glaucous-winged gulls with a comparison of body water and water flux in avian species with and without salt glands. *Physiological Zoology* 60: 481-491.

- Inger, R., G. D. Ruxton, J. Newton, K. Colhoun, J. A. Robinson, A. L. Jackson and S. Bearhop. 2006. Temporal and intrapopulation variation in prey choice of wintering geese determined by stable isotope analysis. *Journal of Animal Ecology* 75: 1190-1200.
- Inger, R. and S. Bearhop. 2008. Applications of stable isotope analyses to avian ecology. *Ibis* 150: 447-461.
- Jennings, S., J. K. Pinnegar, N. V. C. Polunin, and K. J. Warr. 2002. Linking sized-based and trophic analyses of benthic community structure. *Marine Ecology Progress Series* 226: 77-85.
- Johnston, J. W. and K. L. Bildstein. 1990. Dietary salt as a physiological constraint in white ibis breeding in an estuary. *Physiological Zoology* 63: 190-207.
- Kendall, C. 1998. Tracing nitrogen source and cycling in catchments. In isotope tracers in catchment hydrology. In: Kendall, C. and J. J. McDonnell (eds). *Isotope Tracers in Catchment Hydrology*. pp. 519-576. Elsevier Science B.V., Amsterdam.
- Kennerley, P. R. 1990. A review of the status and distribution of the black-faced spoonbill. *Hong Kong Bird Report* 1989: 116-125.
- Kim, W. K. 1999. The agricultural situation of North Korea. Taipei Food and Fertilizer Technology Center, Taipei, Taiwan.c
- Kloskowski, J. 2004. Food provisioning in red-necked grebes (*Podiceps grisegena*) at common carp (*Cyprinus carpio*) ponds. *Hydrobiologia* 424: 131-138.
- Knoff, A. J., S. A. Macko, R. M. Erwin and K. M. Brown. 2002. Stable isotope analysis of temporal variation in the diets of pre-fledged laughing gulls. *Waterbirds* 25: 142-148.

- Kreitler, C.W. 1979. Nitrogen-isotope ratio studies of soils and groundwater nitrate from alluvial fan aquifers in Texas. *Journal of Hydrology* 42: 147–170.
- Kury, C. R. and M. Gochfeld. 1975. Humand interference and gull predation in cormorant colonies. *Biological Conservation* 8: 23-34.
- Lindsay, M. C. and C. E. Meathrel. 2008. Where, when and how? Limitations of the techniques used to examine dietary preference of pacific gulls (*Larus pacificus*) using non-consumed parts of prey and regurgitated pellets of prey remains. *Waterbirds* 31: 611-619.
- Mahoney, S. A. and J. R. Jehl. 1985. Physiological ecology and salt loading of california gulls at an alkaline, hypersaline lake. *Physiological Zoology* 58: 553-563.
- McLellan, N. R. and D. Shutler. 2009. Sources of food delivered to ring-billed, herring and great black-backed gull chicks in marine environments. *Waterbirds* 32: 507-513.
- Minagawa, M. and E. Wada. 1984. Stepwise enrichment of N-15 along food chains further evidence and the relation between delta-N-15 and animal age. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 48: 1135-1140.
- Mizutani, H., M. Fukuda, Y. Kabaya and E. Wada. 1990. Carbon isotope ratio of feathers reveals feeding behavior of cormorants. *Auk* 107: 400-403.
- Moser, M. E. 1986. Prey profitability for adult grey herons *Ardea cinerea* and the constraints of prey size when feeding young nestlings. *Ibis* 128: 392-405.
- Nystrom, K. G. K. and O. Pehrsson. 1988. Salinity as a constraint affecting food and habitat choice of mussel-feeding diving ducks. *Ibis* 130: 94-110.
- Paritte J. M. and F. K. Jeffrey. 2009. Effect of cleaning regime on stable-isotope ratios of feathers in japanese quail (*Coturnix japonica*). *Auk* 126: 165-174.



- Pennycuik, C. J. 1997. Actual and 'optimum' flight speeds: field data reassessed. *Journal of Experimental Biology* 200: 2355-2361.
- Pennycuik, C. J., and T. DeSanto. 1989. Flight speeds and energy requirements for white ibises on foraging flights. *Auk* 106: 141-144.
- Peterson, B. J. 1999. Stable isotopes as tracers of organic matter input and transfer in benthic food webs: a review. *Acta Oecologica* 20: 479-487.
- Phillips, D. L. and J. W. Gregg. 2001. Uncertainty in source partitioning using stable isotopes. *Oecologia* 127: 171-179.
- Purdue, J. R. and H. Haines. 1977. Salt water tolerance and water turnover in the snowy plover. *Auk* 94: 248-255.
- Remacha, C. and J. A. Delgado. 2009. Spatial nest-box selection of cavity-nesting bird species in response to proximity to recreational infrastructures. *Landscape Urban Plan* 93: 46-53.
- Schlacher, T. A., B. Liddell, T. F. Gaston and M. Schlacher-Hoenlinger. 2005. Fish track wastewater pollution to estuaries. *Oecologia* 144: 570-584.
- Steenweg, R. J., R. A. Roconi and M. L. Leonard. 2011. Seasonal and age-dependent dietary partitioning between the great black-backed and herring Gulls. *Condor* 113: 795-805.
- Swennen, C., and Y. T. Yu. 2005. Food and feeding behavior of the black-faced spoonbill. *Waterbirds* 28: 19-27.
- Thompson, D. R. and R. W. Furness. 1995. Stable-isotope ratios of carbon and nitrogen in feathers indicate seasonal dietary shifts in northern fulmar. *Auk* 112: 493-498.
- Tremblay, J. and L. N. Ellison. 1979. Effects of human disturbance on breeding of black-crowned night herons. *Auk* 96: 364-369.

- Ueng, Y. T., J. J. Perng, J. P. Wang, J. H. Weng and P. D. L. Hou. 2007. Diet of the black-faced spoonbill wintering at Chiku Wetland in Southwestern Taiwan. *Waterbirds* 30: 86-91.
- Ueta, M., D. S. Melville, Y. Wang, K. Ozaki, Y. Kanai, P. J. Leader, C. C. Wang and C. Y. Kuo. 2002. Discovery of the breeding sites and migration routes of black-faced spoonbills *Platalea minor*. *Ibis* 144: 340-343.
- Valiela, I., M. Geist, J. McClelland and G. Tomasky. 2000. Nitrogen loading from watersheds to estuaries: verification of the Waquoit Bay nitrogen loading model. *Biogeochemistry*. 49: 277-293
- Vanderklift, M. A. and S. Ponsard. 2003. Sources of variation in consumer-diet delta N-15 enrichment: a meta-analysis. *Oecologia* 136: 169-182.
- Votier, S. C., S. Bearhop, A. MacCormick, N. Ratcliffe and R. W. Furness. 2003. Assessing the diet of great skuas, *Catharacta skua*, using five different techniques. *Polar Biology* 26: 20-26.
- Wei, G. A., F. M. Lei, Z. H. Yin, C. Q. Ding and W. N. Ding. 2005. Nesting and disturbance of the black-faced spoonbill in Liaoning Province, China. *International Journal of Waterbird Biology* 28: 420-425.
- Wood, C., H. Tomida, J. H. Kim, K. S. Lee, H. J. Cho, S. Nishida, J. Ibrahim, W. H. Hur, H. J. Kim, S. H. Kim, H. Koike, G. Fujita, H. Higuchi and T. Yahara. 2013. New perspectives on habitat selection by the black-faced spoonbill *Platalea minor* based upon satellite telemetry. *Bird Conservation International* 23: 495-501.
- Yeung, C. K. L., C. T. Yao, Y. C. Hsu, J. P. Wang and S. H. Li. 2005. Assessment of the historical population size of an endangered bird, the black-faced spoonbill (*Platalea minor*) by analysis of mitochondrial DNA diversity. *Animal Conservation* 9: 1-10.
- Yu, Y. T. and C. Swennen. 2004a. Feeding of wintering black-faced spoonbills in Hong Kong: When and how long? *Waterbirds* 27: 135-140.

Yu, Y. T. and C. Swennen. 2004b. Habitat use of the black-faced spoonbill. *Waterbirds* 27: 129-134.

Yu, Y. T., K. T. Chan, H. H. N. Fong and I. W. L. Tse. 2013. International black-faced spoonbill census 2013. Black-faced Spoonbill Research Group, The Hong Kong Bird Watching Society. Hong Kong.

## Abstract

# Temporal and Spatial Changes in the Diets of Young Black-faced Spoonbills (*Platalea minor*) revealed by Stable Isotope Analysis

Jeong, Min-su

Major in Forest Environmental Sciences

The Graduate School

Seoul National University

The endangered Black-faced Spoonbill (*Platalea minor*) mainly breeds in the Korean Peninsula; in spite of its importance as key breeding areas, little information on its breeding status and feeding habit during the breeding season is available. This study was conducted to investigate the breeding status, the temporal and spatial change in the diets during brood-rearing season and to propose implications for the conservation of habitats of Black-faced Spoonbills. From May to July 2013, the number of breeding pairs was counted, and the tip (grown at the age of 10 days) and middle (grown at the age of 22 days) portions of a primary feather of each juvenile spoonbill were collected in Guji Island, Suha Islet, Namdong Reservoir and Chilsan Island. Carbon ( $\delta^{13}\text{C}$ ) and Nitrogen stable isotopes ( $\delta^{15}\text{N}$ ) of the collected feathers were analyzed to examine the temporal and spatial variation in the diets of juvenile Black-faced

Spoonbills and two-source isotopic mixing model for  $\delta^{13}\text{C}$  was used to estimate the proportion of marine and freshwater prey by age and breeding sites. As a result, a total of 309 breeding pairs were observed: 149 pairs on Guji Island, 40 pairs on Suha Islet, 93 pairs on Namdong Reservoir, and 27 pairs on Chilsan Island. Analysis of  $\delta^{13}\text{C}$  indicated that the juveniles were fed by prey from both freshwater wetlands and mudflats in all study areas; although Guji Island is the farthest breeding site away from available freshwater wetlands, the estimated contribution of freshwater prey was higher than the other breeding sites. Also the  $\delta^{13}\text{C}$  value of feather grown at the age of 22 days was significantly higher than that of 10 days regardless of breeding sites, suggesting that the ratio of freshwater foods decreases over the nestling growth. This result supports the hypothesis that the salt glands of new hatchlings of Black-faced Spoonbills may not be fully functioning, and indicates that the reliance on freshwater prey may be higher during the early chick growth period. The  $\delta^{15}\text{N}$  value was the highest in Chilsan Island, followed by Suha Islet and Namdong Reservoir, and the lowest at Guji Island. This was probably caused by the consumption of prey in higher trophic level or of nitrogen contamination in Chilsan Island, whereas the juveniles were fed by prey in lower trophic level or exposed to lower level of nitrogen contamination in Guji Island. Furthermore, the value of  $\delta^{15}\text{N}$  was not different between two age groups in Guji Island, Suha Islet and Namdong Reservoir while it significantly decreased on Chilsan Island by growth. Temporary influx of contaminants such fertilizers or the increased availability of prey in high trophic level in the early chick growth period probably caused this change on Chilsan Island. Therefore, further analysis on nitrogen contamination as well as stable isotope analysis from dietary sources are required to tell the effect of nitrogen contamination from that of prey selection on the temporal and spatial variation in the value of  $\delta^{15}\text{N}$ . The number of breeding pairs in Guji Island, Suha Islet, Namdong Reservoir and Chilsan Island accounted for 22.67% of the world population of spoonbills, suggesting that the study areas are important breeding sites for the conservation of threatened Black-faced Spoonbills. Therefore, the protection of the breeding

sites and the adaptive management of its adjacent feeding areas both in freshwater wetlands and mudflats are recommended through designation of new protected areas, cooperation among diverse stakeholders, contamination control, and public awareness programs.

Keywords: Black-faced Spoonbill, breeding ecology, dietary variation, feeding habit, stable isotope

Student number: 2012-21115

## 감사의 글

오랜 기간 전공해온 음악을 그만두고 동물에 대한 막연한 흥미만으로 대학원을 입학하였기에, 야외조사, 연구, 논문 등 모든 것이 어렵고 막막했습니다. 그러나 힘들 때마다 격려해주시고, 하나부터 열까지 성심껏 가르쳐주신 분들이 있었기에 논문을 완성하고, 아직 부족하지만 연구실에 들어왔을 때보다 발전된 모습으로 학위를 마칠 수 있게 된 것 같습니다. 비록 제가 받은 은혜에 대한 고마움을 다 표현할 수는 없지만 여기까지 올 수 있도록 이끌어주신 주변의 모든 분들께 이 글을 통해 짧게나마 감사의 말씀을 전합니다.

우선 부족한 저를 받아주시고 깊은 관심으로 학문의 길로 이끌어 주신 이우신 교수님께 진심으로 감사 드립니다. 또한 바쁘신 와중에도 심사위원장을 맡아주신 김현석 교수님과 심사위원과 연구실 선배로서 논문 지도뿐만 아니라 학문적, 정신적으로 많은 가르침을 주신 최창용 박사님께도 감사의 마음을 전합니다. 그리고 대학원 생활 동안 많은 가르침을 주신 윤여창, 임상준, 정주상, 윤여창, 김성일, 장진성, 임상준, 박필선, 강규석, Victor 교수님께도 감사 드립니다.

그리고 방장으로서 연구실을 이끌어가시는 성진 오빠, 어려운 일이 있을 때마다 조언과 도움을 아끼지 않는 종우 오빠, 처음엔 무서웠지만 누구보다도 친절하고 재미있는 성민 오빠, 항상 열심히 하라고 격려해주시는 화수 오빠, 연구실에 입학했을 때 친절하게 다가와 주었던 세영 언니, 옆자리에서 웃음을 주시는 창득 오빠, 언제나 마음 편히 얘기를 나눌 수 있는 화연 언니, 연구실 동기로서 많은 고

민들을 함께 나누었던 지화 오빠, 언제라도 믿을 수 있는 준수, 항상 동생들을 챙겨주시는 시원 오빠, 남극에서 논문을 마무리할 수 있도록 많은 배려를 해준 한규 오빠, 앞으로 많은 연구활동을 함께 하고 싶은 누리, 표본 제작뿐만 아니라 여러 조사방법에 대해서 자세하게 가르쳐 주셨던 현진 오빠, 수많은 연구실 행정업무를 밤늦게 까지 처리해 주시는 현정 언니, 항상 밝은 모습으로 유쾌한 분위기를 만들어주시는 도영 오빠, 연구 및 논문 작성에 대해 많은 조언을 해주신 김백준 박사님, 지금은 고향으로 돌아간 노메이레이 언니, 제이슨, 이 모든 분들께 감사 드립니다.

지금은 자주 만나기 어렵지만 학창 시절 항상 붙어 다녔던 이유나, 한효주, 나운미, 그리고 학부시절부터 지금까지 함께하며 곁에서 힘이 되어준 권은화, 양시엽, 이홍민, 윤서영, 박기수, 이종수, 박종호, 이다정 등 AAA 07 동기 및 선후배님들과 과 동기인 조아미, 원은이, 김예지에게도 고마움을 전합니다. 또한 어렸을 때부터 집에서 떨어져 생활하던 저를 보살펴주시고 격려해주신 윤선숙 선생님께도 감사를 드립니다.

무엇보다도 제 연구가 가능할 수 있도록 도와주시고 모든 저어새 변식지를 가볼 수 있도록 챙겨주신 이기섭 박사님과 함께 조사를 다니면서 많은 도움을 주신 권인기 오빠와 지연이에게도 감사를 전합니다.

마지막으로 언제나 하고 싶은 일을 하라고 말씀해주시고 지원해주시는 사랑하는 부모님께 이 논문을 바칩니다.