

Research Paper

연안환경 수은 모니터링용 갯가리새 알의 산란순서별 농도 차이

이장호* · 이종천* · 장희연* · 박종혁** · 최정희* · 이수용* · 심규영*

국립환경과학원 자연환경연구과*, 새만금유역환경청**

Mercury Concentrations of Black-tailed Gull Eggs Depending on the Egg-Laying Order for Marine Environmental Monitoring

Jangho Lee* · Jongchun Lee* · Heeyeon Jang* · Jong-Hyouk Park** · Jeong-Heui Choi* · Soo Yong Lee* · Kyuyoung Shim*

Natural Environment Research Division, National Institute of Environmental Research*
Saemangeum Regional Environmental Office**

요약 : 본 연구에서는 연안환경 오염물질 중 수은의 생물축적 모니터링 지표종인 갯가리새(*Larus crassirostris*) 알의 산란순서 간 수은 농도차이를 서해 백령도 번식지를 대상으로 분석하였다. 첫 번째(평균±표준오차, 234.4 ± 11.2 ng/g wet) 산란한 알의 총수은 농도는 두 번째(182.8 ± 9.1 ng/g wet) 산란한 알에 비해 통계적으로 유의하게 높게 나타났다(각 n=18, t=8.4, p<0.01). 또한 생체특성치에서도 장경, 단경, 중량 모두 첫 번째 알(길이: 63.10 ± 0.49 mm, 단경: 44.51 ± 0.19 mm, 중량 65.53 ± 0.87 g)이 두 번째 알(장경: 62.37 ± 0.40 mm, 단경: 43.55 ± 0.17 mm, 62.48 ± 0.72 g)보다 통계적으로 유의하게 높게 나타났다(각 n=18, 장경 t=2.4, p<0.05; 단경 t=4.3, p<0.01; 중량 t=4.2, p<0.01). 이러한 차이는 알 생성기에 암컷이 섭취하는 먹이량과 관련이 있으며, 이는 수컷이 암컷에게 먹이를 공급하다가 첫 번째 알을 낳으면 급이 빈도와 양을 줄이는 구애급이 행동패턴 변화와 관련이 있는 것으로 추측된다. 특히, 암컷의 섭취량 감소는 메틸수은이 주로 존재하는 알 속 흰자(albumen)의 감소에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 따라서 수은의 경우, 산란순서에 따라 축적농도가 감소하는 경향이 뚜렷하기 때문에 지역 간 그리고 시기별 비교 모니터링을 수행할 때는 목적과 조사여건(번식결과를 고려한 채취 시기, 入島·체

First author: Jangho Lee, Natural Environment Research Division, National Institute of Environmental Research, Incheon 22689, Korea, Tel: +82-32-560-7590, E-mail: ficedula01@korea.kr

Corresponding Author: Heeyeon Jang, Natural Environment Research Division, National Institute of Environmental Research, Incheon 22689, Korea, Tel: +82-32-560-7593, E-mail: hee22@korea.kr

Co-author: Jongchun Lee, Natural Environment Research Division, National Institute of Environmental Research, Incheon 22689, Korea, E-mail: roundvoid@korea.kr

Jong-Hyouk Park, Saemangeum Regional Environmental Office, Jeonju, Jeollabuk-do, Korea. E-mail: jhpark15@korea.kr

Jeong-Heui Choi, Natural Environment Research Division, National Institute of Environmental Research, Incheon 22689, Korea, E-mail: ninano765@korea.kr

Soo Yong Lee, Natural Environment Research Division, National Institute of Environmental Research, Incheon 22689, Korea, E-mail: randol84@korea.kr

Kyuyoung Shim, Natural Environment Research Division, National Institute of Environmental Research, Incheon 22689, Korea, E-mail: sky121@korea.kr

Received: 25 September, 2017. Revised: 14 December, 2017. Accepted: 26 December, 2017.

류가능기간 등) 등을 고려하여 둥지 내 알 선택방법(첫 번째 알만 선택 또는 두 번째 알만 선택 또는 랜덤 선택 등)을 일관되게 적용하는 것이 중요하다고 판단된다.

주요어 : 갯이갈매기, 수은, 알 산란순서

Abstract : In this study, total mercury (THg) of Black-tailed Gull (*Larus crassirostris*) eggs laid on Baengnyeongdo, West Sea of Korea was analyzed in order to compare the THg concentrations of eggs depending on egg-laying order. The first-laid eggs (mean \pm standard error, 234.4 ± 11.2 ng/g wet, $n=18$, $t=8.4$, $p < 0.01$) significantly had higher THg concentrations than the second-laid eggs (182.8 ± 9.1 ng/g wet, $n=18$). Also, the first-laid eggs had higher values in biometrics (length 63.10 ± 0.49 mm, $t=2.4$, $p < 0.05$; width 44.51 ± 0.19 mm, $t=4.3$, $p < 0.01$; weight 65.53 ± 0.87 g, $t=4.2$, $p < 0.01$) than the second-laid eggs (length 62.37 ± 0.40 mm, width 43.55 ± 0.17 mm, and weight 62.48 ± 0.72 g). These differences might be attributed to the amount of food eaten by females relating to males' courtship feeding pattern (males increase courtship feeding rate before the first eggs are laid, and decrease the rate following the laying of the first eggs). Moreover, the lower food intake of females could diminish the quantities of egg albumen that contains a protein binds to most of methylmercury during the period of egg production. Therefore, it is necessary to consistently apply one of egg selection methods (targeted selection (the first-laid egg or the second-laid egg), random selection, and etc.) in one nest for ensuring comparability of mercury concentrations among monitoring sites and monitoring years.

Keywords : Black-tailed Gull, Mercury, Egg-laying Order

I. 서론

수은(Mercury, Hg)은 생태계에 악영향을 미치는 대표적인 오염물질로 알려져 있다(Burger et al. 2009; Burgess et al. 2013; Lewis et al. 1993). 특히, 해양생태계에서 생물축적과 먹이사슬을 통한 이들 오염물질의 전이는 해양생물의 생리학적 대사 및 사람의 건강에 위해를 주는 심각한 문제로 여겨지고 있다(Lee et al. 1987; Rajaei et al. 2010; Sagerup et al. 2009; Szumilo et al. 2010).

한국의 연안환경도 마찬가지인데, 특히 서해는 중국, 북한과 인접해 있고, 월경성 오염물질의 유출입 문제로 관심의 대상이 되고 있는데, 퇴적물, 어류, 이매패류 등에 대한 수은 축적 연구가 꾸준히 진행되어 왔다(Choi et al. 1992; Hwang et al. 2016; Islam et al. 2010; Luo et al. 2010; Park et al. 2017).

해양생물 중 조류는 고차소비자로서 먹이사슬을 통한 오염물질 축적영향을 크게 받는 것으로 알려져 있는데, 특히, 갈매기류는 어류, 연체류 등을 먹는 상

위포식자로서 수은 등의 오염물질 축적 모니터링 생물로서 많이 연구되어 왔다(Koster et al. 1996; Lewis et al. 1993; Rajaei et al. 2010; Rudel et al. 2010; Sagerup et al. 2009). 또한 알 시료를 활용한 모니터링은 갈매기 개체 자체를 죽일 필요가 없고, 번식 시기의 환경오염 상황을 적절히 반영하는 장점이 있어 널리 이용되고 있다(Ewins et al. 1999; Klein et al. 2012; Morales et al. 2012). 우리나라에서 조류를 대상으로 한 오염물질 모니터링 연구는 많은 부분이 체내 장기 조직(간, 신장 등)이나 깃털에서의 중금속(납, 카드뮴 등) 축적 특성을 대상으로 해 왔다(Appendix 1, Honda et al. 1986; Kim et al. 2001; 2003; 2006; 2009; Kim and Koo 2008; Kim and Oh 2012; 2014; 2015; Lee et al. 1987; 2014; Nam et al. 2001; 2002; 2003; Shin et al. 2008). 이에 비해 알에 대한 오염물질 축적 연구는 매우 적은 편이다(Choi et al. 2001a; Kim and Oh 2014; Lee et al. 2014; Nam et al. 2003).

납이나 카드뮴 같은 특정 중금속은 알의 난소 (ovary)에 형성된 방해기작으로 인해 저농도로 알에 축적되는 특성이 있다고 알려져 있다(Dauwe et al. 1999; Nisianakis et al. 2009; Paulus et al. 2010). 이 같은 특성으로 인해 알 내용물(egg content)을 위해 중금속 모니터링 시료로 활용하는 데는 한계가 있다고 볼 수 있다. 하지만 알은 노른자의 지질(lipid) 성분과 관련한 친유성(親油性, lipophilic property)을 띠는 유기오염물질(DDTs 등)에 대한 축적과 흰자의 단백질 성분과 관련해 메틸기(CH_3Hg^+)를 지닌 수은에 대한 축적이 잘 이루어지기 때문에 알을 활용한 이들 오염물질에 대한 모니터링 연구는 세계적으로 활발히 진행되어 왔다(Ackerman et al. 2013; 2016; Klein et al. 2012; Nagel & Haag-Wackernagel, 2001; Paulus et al. 2010). 하지만 해양에서의 오염물질 생물축적 모니터링에서의 조류 알 활용이 세계적으로 강조되는 반면, 한국 연안에서는 해양성 조류 알을 활용한 연구는 거의 없는 실정이다(Appendix 1).

이에 국립환경과학원 국가환경시료은행은 서해의 오염물질 생물 축적을 모니터링하기 위해 갯가리갈매기(*Larus crassirostris*) 알을 채취, 저장, 분석하는 체계 구축작업을 시작하였다. 하지만 알 시료를 활용한 모니터링 시 알 산란순서 고려에 대한 필요성이 제기되어 왔는데, 이는 모니터링용으로 채취되는 알이 어떤 산란순서에 해당하느냐에 따라 축적된 오염물질 농도가 달라지기 때문이다(Klein et al. 2012). 수은의 경우, 산란순서에서 나중에 낳은 알의 수은 농도가 줄어드는 것으로 보고된 바 있다(Ackerman et al. 2016).

따라서 한국 서해에서 고차소비자인 갈매기의 오염물질 생물축적 모니터링을 위해서는 산란순서 간 오염물질 농도 수준을 비교, 검토하는 기초 연구가 선행될 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 서해 백령도의 번식기 갯가리갈매기 알을 채취하여 산란순서 간 수은 농도 차이를 분석한 후 그 이유를 고찰하고 모니터링용 알 채취 시 고려해야 할 점들을 제안하였다.

II. 연구방법

연구의 대상인 갯가리갈매기는 한국에서 텃새이며, 개체수가 풍부한 대표적인 갈매기이다(Won 1981). 한배 산란수는 평균 2~3개로 알려져 있으며, 알은 첫 번째 알이 산란된 후, 하루 걸러 산란되는 것으로 알려져 있다(Yoo & Kwon 1997; Yu et al. 2006). 번식기 때는 섬 등에서 번식하고, 이후 내륙으로 분산하여 서식한 후 이듬해 다시 번식지를 찾는다. 대상 연구지인 백령도는 중국, 북한, 한국의 3국이 인접한 곳에 위치하고 있는 서해의 대표적인 갯가리갈매기 번식지이다(Figure 1).

조사는 2016년 4월 25일 ~ 28일까지 4일 동안 이루어졌다. 약 50×100 m의 조사 plot을 정하고, plot 내의 둥지 335개를 표시하였다. 그리고 알 산란순서를 구별하기 위하여 알마다 색연필로 산란순서를 표시하였다. 조사 4일 동안 2개 알을 낳은 둥지 총 18개를 확인하였고, 이들 둥지의 첫 번째, 두 번째 산란 알 각각 18개씩을 대상으로 분석하였다(Figure 2). 채취된 알은 버어니어 캘리퍼스(Mitutoyo, Absolute Digimatic Caliper, minimum indication 0.01 mm)를 이용하여 소숫점 둘째자리까지 장경(mm) 및 단경(mm)을 측정하였고, 저울(AND kc-2000, minimum indication 0.01 g)로 생중량(g)을 소숫점 둘째자리까지 측정하였다. 이후 에탄올로 세척한 메스로 알을 갈라 내용물을 용기에 담은 후 기화된 액체질소(기화점: -196°C)를 이용하여 초저온 저장하였다. 저장된 알은

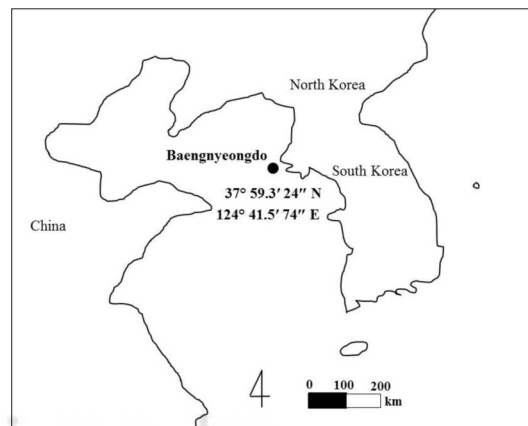


Figure 1. The location of Baengnyeongdo as the survey site



Figure 2. Black-tailed Gull and the tagging & marking method

초저온 상태에서 볼밀(Fritsch Planetary Mill)을 이용하여 분쇄하고 분쇄시료의 90 % 이상이 200 μm 이하의 크기가 되도록 균질화하였다(Rudel et al. 2008). 본 연구에서는 총수은을 측정하였다. 이는 조류 알 총수은의 대부분(약 96 %)은 독성인 메틸수은(Methylmercury)이 차지하기 때문에 총수은을 메틸수은의 지표로서 측정하였다(Ackerman et al. 2013; 2016). 총수은 분석은 골드아말감법을 이용하여 약 0.05 g의 시료를 수은분석기(SP-3D, Nippon Instruments Corporation)에 직접 주입하여 350 $^{\circ}\text{C}$ (4min), 700 $^{\circ}\text{C}$ (6 min) 조건에서 농도를 분석하였다. 총수은 분석용 첨가제는 Sodium carbonate anhydrous와 Calcium hydroxide를 1:1(w/w)로 혼

합한 HG-MHT와 HG-BHT (Aluminium oxide anhydrous)로 750 $^{\circ}\text{C}$ 에서 4시간 가열처리 후 사용하였다. 혼합의 수은분석을 위한 정도관리는 SRM (SRM 2976, Trace elements and methylmercury in mussel tissues, NIST, 보증농도 : 61.0 ± 3.6 ng/g)을 이용하였다. 회수율 실험은 표준물질첨가법으로 실시하였는데, 일정량의 SRM에 수은 10 ng과 20 ng이 되도록 표준용액을 첨가하였고, 각각 3반복 실험하였다. 본 시험법의 직선성(r^2)은 0.9977로써 매우 우수하였고, 검출한계(LOD)와 정량한계(LOQ)는 각각 10 ng/g과 30 ng/g이었다(Table 1). 정확도(accuracy)와 정밀도(precision)는 각각 101.6 %와 13.8 %였으며, SRM을 5회 분석한 결과 60.8 ± 1.0

Table 1. The results of linearity, LOD (limit of detection), LOQ (limit of quantification), accuracy, and precision in total mercury analysis

Linearity		LOD (ng/g)	LOQ (ng/g)	Accuracy(%)	Precision (%)
Range (ng/g)	r^2				
30 ~ 625	0.9977	10	30	101.6	13.8

ng/g으로서 보증농도와 매우 유사하였다.

그리고 산란순서 간 평균값 비교는 t-test 쌍체비교 방법으로 실시하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 산란순서별 알 생체특성치 비교

산란순서별 알의 생체특성치 차이를 비교하기 위해 백령도 갯가래의 첫 번째 알(1st eggs)과 두 번째 알(2nd eggs)을 비교하였다(Figure 3). 장경(length)은 첫 번째 알이 평균 63.10 ± 0.49 mm, 두 번째 알이 62.37 ± 0.40 mm로 나타났으며, 통계적으로 유의한 차이를 보였다(각 n=18, t=2.4, $p < 0.05$). 단경(width)도 첫 번째 알이 평균 44.51 ± 0.19 mm, 두 번째 알이 43.55 ± 0.17 mm로 통계적으로 유의한 차이를 보였다(각 n=18, t=4.3, $p < 0.01$). 생중량(fresh weight) 또한 첫 번째 알이 평균 65.53 ± 0.87 g, 두 번째 알이 62.48 ± 0.72 g으로 나타났으며, 통계적으로 유의한 차이가 나타났다.(각 n=18, t=4.2, $p < 0.01$).

Yu et al. (2006)이 1988년에 남해 황도 갯가래 기 알을 조사한 결과를 보면, 첫 번째 알의 평균 크기(장경: 62.7 ± 2.3 mm, 단경: 43.1 ± 1.3 mm, 생중량: 57.9 ± 3.8 g)는 두 번째 알의 평균 크기(장경: 61.3 ± 2.1 mm, 단경: 43.4 ± 1.0 mm, 생중량: 56.1 ± 3.7 g)에 비해 장경과 중량에서 높은 값을 나타냈다. 국외 갯가래류 연구 사례를 보면, Parsons (1976)가 수행한 스코트랜드의 Herring Gull (*Larus argentatus*)의 알 산란순서 간 생체특성치 결과에서도 두 알을 낳은 등지에서 첫 번째 알(86.8 ± 1.60 g)이 두 번째(84.7 ± 1.25 g)에 비해 상대적으로 높게 나타났다. 또한 Royle et al. (1999)은 영국의 Lesser Black-backed Gull (*Larus fuscus*) 조사에서 첫 번째 알(73.07 ± 1.39 cm³), 두 번째 알(71.38 ± 1.26 cm³), 세 번째 알(63.97 ± 1.72 cm³) 순으로 부피가 점점 줄어들었다고 보고한 바 있다. Ruiz et al. (2000)이 스페인의 Ebro Delta에서 Audouin's Gull (*Larus audouinii*)의 산란순서 간 노른자(yolk)와 흰자(albumen)의 부피 변화를 모의분석(simulation analysis)한 결과, 산란순서 간

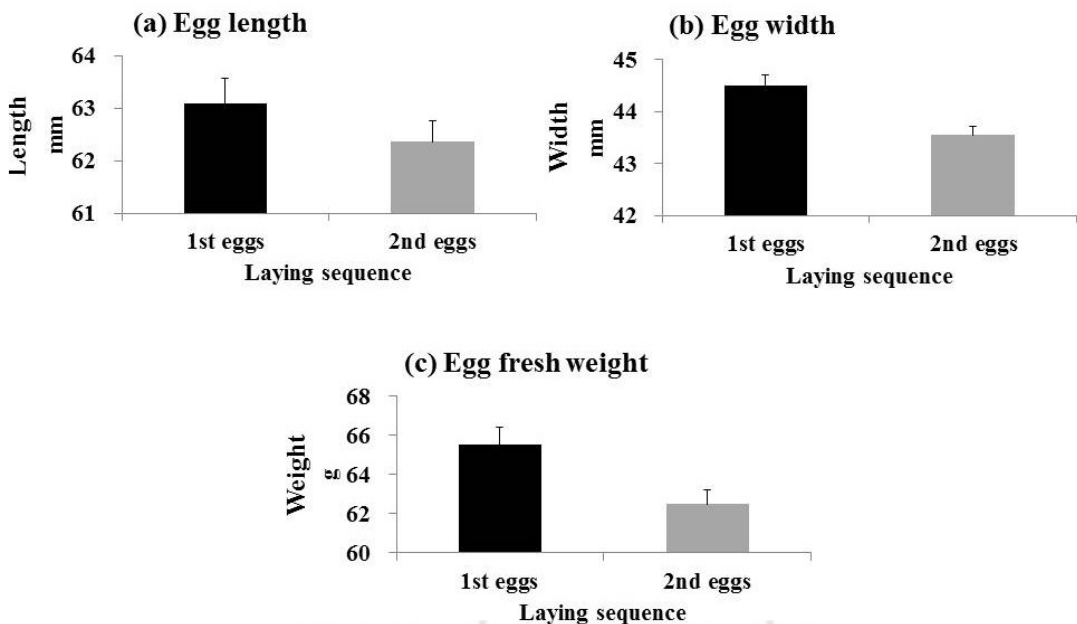


Figure 3. The comparison of biometrics (length, width, and weight) between first-laid eggs and second-laid eggs of the Black-tailed gulls breeding on Baengnyeongdo in 2016

노른자의 부피변화가 거의 없었지만, 흰자는 산란순서에 따라 부피가 줄어드는 것으로 나타났다. Salzer and Larkin (1990)은 Glaucous-winged Gull (*Larus glaucescens*) 연구에서 구애급이(courtship feeding)가 산란순서 간 알 크기에 영향을 줄 수 있다고 주장한 바 있는데, 번식기 때 수컷은 산란 준비 중인 암컷에게 구애급이를 통해 먹이를 공급하는 데, 암컷이 첫 번째 알을 낳으면 수컷이 둥지를 지키는 짝보호(mate guarding) 행동이 증가하면서 암컷에 대한 구애급이는 감소한다고 알려져 있다. 이로 인해 두 번째부터의 알 생성에 필요한 물질이 첫 번째 낳은 알에 비해 적게 공급될 가능성이 있다.

Parsons (1970)은 Herring Gull (*Larus argentatus*)의 마지막 낳은 세 번째 알들은 먼저 낳은 알들에 비해 크기가 작고 늦게 부화하는 특징으로 인해 새끼의 생존율이 낮다고 보고한 바 있다. Kwon et al. (2006)도 남해 홍도에서 갯이갈매기 알 산란순서 간 부화한 새끼의 번식성공율을 비교한 결과, 평균 크기가 가장 큰 첫 번째 알이 이후에 낳은 알들에 비해 번식성공율이 상대적으로 높게 나타났다고 보고한 바 있다. 또한 일찍 낳은 알의 경우, 알품기(incubation)가 먼저 들어가기 때문에 두 번째나 세 번째 낳은 알보다 먼저 부화(hatching)가 이루어지며, 이로 인해 어미의 보살핌을 상대적으로 더 많이 받을 수 있어 새끼의 생존율이 늦게 낳은 알들에 비해 클 수도 있다(Parsons 1970). 갯이갈매기도 첫 번째 알을 낳은 직후 알품기를 시작하는 것으로 알려져 있으며, 한 둥지 내 알들 간의 부화 불일치 시간은 1997년 남해 통영 홍도의 갯이갈매기의 경우, 0.5~3.5일로 나타난 바 있다(Yoo & Kwon 1997). 이렇게 한 둥지 내 알들 간의 부화 불일치(hatching asynchrony)는 부화 후 새끼들에 대한 어미의 보살핌의 차이를 야기하고, 결국 새끼의 생존율의 차이를 야기할 수 있다(Kwon et al. 2006). 이럴 경우, 늦게 낳은 알들의 상대적으로 작은 크기가 오히려 새끼의 생존율을 높이는 장점으로도 기여할 수 있다는 주장도 있다. 즉, 늦게 낳은 알의 크기가 작으면 알품기 기간이 단축되어 일찍 낳은 알과의 부화시간 차이가 줄어들어 부화한 새끼들이 비슷한 시간에 어미의 돌봄을 함께 받을 가능성이

있다는 것이다(Parsons 1976).

Kwon et al. (2006)의 남해 홍도 갯이갈매기의 번식성공율(전체산란한 알 수에 대한 이소산 새끼 수의 비율)은 첫 번째 낳은 큰 알조차도 41% 정도로 높지 않기 때문에 산란기에 평균 두 알을 낳아 종족 번식을 이루어야 하는 갯이갈매기 집단으로서는 열악한 번식환경에서 한 알이라도 큰 알을 낳아 새끼의 생존율을 높이는 진화전략을 택했을 가능성이 있다고 판단된다(Saino et al. 2010).

2. 산란순서별 알 오염물질 농도 비교

산란순서별 알의 오염물질 농도를 비교하기 위해 백령도 갯이갈매기의 첫 번째 알(1st eggs)과 두 번째 알(2nd eggs)을 비교하였다(Figure 4). 총수은은 산란순서 간 차이에서 첫 번째 알이 두 번째 알보다 상대적으로 높은 농도를 보였는데, 첫 번째 알이 평균 234.4 ± 11.2 ng/g wet, 두 번째 알이 182.8 ± 9.1 ng/g wet으로 나타났으며, 통계적으로 유의한 차이가 있었다(각 $n=18$, $t=8.4$, $p<0.01$).

Becker (1992)가 독일 Wadden Sea의 Jade만에 서 Herring Gull (*Larus argentatus*)의 산란순서 간 총수은 농도를 비교한 결과, 첫 번째 알(0.43 ± 0.18 mg/kg wet), 두 번째 알(0.37 ± 0.16 mg/kg wet), 세 번째 알(0.31 ± 0.12 mg/kg wet) 순으로 낮아졌고, 첫 번째 알과 세 번째 알 간에 통계적으로 유의한 차이를 보였다. Sanpera et al. (1997)이 수행한 스페인 메데스(Medes) 섬의 Yellow-legged Gull (*Larus cachinnans*)의 산란순서 간 총수은 농도 비

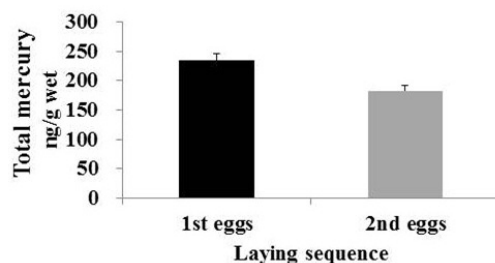


Figure 4. The comparison of total mercury concentrations between first-laid eggs and second-laid eggs of the Black-tailed gulls breeding on Baengnyeongdo in 2016

교에서도 첫 번째 알(0.65 ± 0.32 ug/g dry), 두 번째 알(0.50 ± 0.26 ug/g dry), 세 번째 알(0.41 ± 0.25 ug/g dry) 순으로 점점 낮아졌고, 첫 번째 알은 나머지 두 알과 통계적으로도 유의한 차이가 보고된 바 있다. 또한 Morera et al. (1997)이 수행한 스페인 Ebra Delta의 Audouin's Gull (*Larus audouinii*) 산란순서 간 총수는 농도 비교에서는 첫 번째 알(5.23 ± 1.30 ug/g dry)이 두 번째 알(4.77 ± 1.77 ug/g dry) 보다 통계적으로 유의하게 높게 나타났다. Sanpera et al. (2000)도 Audouin's Gull (*Larus audouinii*)의 연구에서 일찍 낳는 알의 수는 농도가 나중에 낳은 알 보다 대체로 높다고 보고한 바 있는데, 그 이유로 산란순서에 따른 알 속 흰자(albumen) 속의 수은 농도 감소를 주장하였다. 수은은 조류 알에 독성이 강한 메틸수은(methylmercury) 형태로 대부분 존재하는데, 메틸기(CH_3Hg^+)는 대부분 단백질에 결합하여 존재하며, 특히, 알 단백질의 상당 부분을 차지하는 흰자(albumen)에 축적되는 것으로 알려져 있다(Ackerman et al, 2013; 2016). 갈매기류의 산란 과정에서 흰자의 생성물질은 체내에 장기간 축적된 물질에서 공급되기 보다는 번식기 동안 매일 먹는 먹이로 부터 직접 공급되는 것으로 알려져 있다(Lewis et al, 1993, Sanpera et al. 2000). Heinz and Hoffman (2004)는 평균 1.16일에 한 알씩 낳는 사육 청둥오리(*Anas platyrhynchos*)를 대상으로 수은에 오염된 먹이급여 실험을 실시하여 알의 수은 축적 및 감소 정도를 모니터링하였는데, 16 번째 알이 산란될 때까지 오염된 먹이 급여를 지속하면서 산란 알의 흰자 속 수은 농도를 꾸준히 증가시켰다. 하지만 이후 오염된 먹이 급여를 중단하고 비오염된 먹이를 급여하자, 알 흰자의 수은 농도가 즉시 감소하기 시작하여 40 여번째 알에서는 정상적인 저농도로 회복하였다고 보고하였다. 이는 오염된 먹이의 꾸준한 급여로 인해 체내에 축적된 수은 농도가 상당함에도 불구하고 알 흰자 속의 수은 축적은 매일 급여되는 먹이에 영향을 받는다고 볼 수 있다.

자연 상태에서는 번식기 동안 매일 섭취하는 먹이 양이 알의 흰자로 유입되는 물질의 양을 결정하는 중요한 요소가 될 수 있으며, 많은 양의 먹이 섭취가 이

루어질수록 수은 등의 오염물질 유입은 커질 수밖에 없다. 번식기 때 수컷은 산란 준비 중인 암컷에게 구애급이(courtship feeding)를 통해 먹이를 공급하는데, 암컷이 첫 번째 알을 낳으면 알을 보호하는 짝보호(mate guarding) 행동이 증가하면서 구애급이가 감소한다고 알려져 있다(Salzer & Larkin 1990). 꿩이갈매기도 산란 전과 산란 중 암컷의 먹이 공급은 수컷에게 대부분 의존하는 구애급이 행동을 하는 것으로 알려져 있다(Yoo & Kwon 1997). 이로 인해 두 번째부터의 알은 흰자 생성에 필요한 물질을 첫 번째 낳은 알에 비해 적게 공급받을 가능성이 크다. 따라서 구애급이에 의해 많은 양의 먹이를 섭취하여 축적된 수은이 첫 번째 알의 흰자에 상대적으로 많이 유입될 가능성이 높은 반면, 두 번째 알부터는 암컷의 줄어든 먹이 섭취량으로 인해 상대적으로 적게 축적된 수은이 알 흰자에 유입될 가능성이 있다(Morera et al, 1997).

V. 결론

본 연구에서는 연안환경 오염물질 생물축적 모니터링을 위해 채취한 꿩이갈매기 알의 산란순서 간 수은 농도 차이를 분석하고 그 이유를 고찰하였다. 산란순서 간 첫 번째 알은 수은 농도와 생체특성치(장경, 단경, 중량) 모두에서 두 번째 알에 비해 통계적으로 유의하게 높게 나타났다. 산란순서 간 알의 생체특성치 차이는 알 생성기에 암컷이 섭취하는 먹이량과 관련이 있으며, 이는 수컷의 구애급이 행동패턴 변화(암컷에게 먹이를 공급하다가 첫 번째 알을 낳으면 급이 빈도와 양 감소)에 영향을 받는 것으로 추측된다. 산란순서에 따른 구애급이의 감소로 특히, 알 속 흰자(albumen)의 양이 감소하는데, 이는 흰자 단백질에 주로 결합하는 메틸수은의 농도 감소에 영향을 주는 것으로 판단된다.

따라서 수은의 경우, 산란순서에 따라 축적농도가 감소하는 경향이 뚜렷하기 때문에 모니터링 목적(지역 간 또는 시기별 비교 등)과 조사여건(번식경과를 고려한 채취 시기, 入島·체류가능기간 등) 등을 고려하여 알 선택방법(첫 번째 알만 선택 또는 두 번째 알

만 선택 또는 랜덤 선택 등)을 일관되게 적용하는 것이 중요하다고 판단된다.

사 사

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2016 -01-01-055).

References

- Ackerman JT, Herzog MP, Schwarzbach SE. 2013. Methylmercury is the predominant form of mercury in bird eggs: a synthesis. *Environ Tech.* 47: 2052-2060.
- Ackerman JT, Eagles-Smith CA, Herzog MP, Yee JL, Hartman CA. 2016. Egg-laying sequence influences egg mercury concentrations and egg size in three bird species: Implications for contaminant monitoring programs. *Environ Toxicol.* 35(6): 1458-1469.
- Becker PH. 1992. Egg mercury levels decline with the laying sequence in Charadriiformes. *Bull Environ Contam Toxicol.* 48: 762-767.
- Burger J, Gochfeld M, Jaitner C, Burke S, Volz CD, Snigaroff R, Snigaroff D, Shukla T, Shukla S. 2009. Mercury and other metals in eggs and feathers of glaucous-winged gulls (*Larus glaucescens*) in the Aleutians. *Environ Monit Assess.* 152(0): 179-194.
- Burgess NM, Bond AL, Hebert CE, Neugebauer E, Champoux L. 2013. Mercury trends in herring gull (*Larus argentatus*) eggs from Atlantic Canada, 1972-2008: temporal change or dietary shift? *Environ Pollut.* 172: 216-222.
- Choi HG, Park JS, Lee PY. 1992. Study on the heavy metal concentration in mussels and oysters from the Korean coastal waters. *Bull Korean Fish Soc.* 15(6): 485-494.
- Choi JW, Matsuda M, Kawano M, Wakimoto T, Iseki N, Masunaga S, Hayama SI, Watanuki Y. 2001a. Chlorinated persistent organic pollutants in black-tailed gulls (*Larus crassirostris*) from Hokkaido, Japan. *Chemosphere.* 44: 1375-1382.
- Choi JW, Matsuda M, Kawano M, Min BY, Wakimoto T. 2001b. Accumulation profiles of persistent organochlorines in waterbirds from an estuary in Korea. *Arch Environ Contam Toxicol.* 41: 353-363.
- Dauwe T, Bervoets L, Blust R, Pinxten R, Eens M. 1999. Are eggshell and egg contents of great and blue tits suitable as indicators of heavy metal pollution?. *Belg J Zool.* 129(2): 439-447.
- Ewins PJ, Postupalsky S, Hughes KD, Weseloh DV. 1999. Organochlorine contaminant residues and shell thickness of eggs from known-age female ospreys (*Pandion haliaetus*) in Michigan during the 1980s. *Environ Pollut.* 104: 295-304.
- Honda K., Min BY, Tatsukawa, R. 1986. Distribution of heavy metals and their age-related changes in the Eastern Great White Egret, *Egretta alba modesta*, in Korea. *Arch Environ Contam Toxicol.* 15: 185-197.
- Hong SH, Shim WJ, Han GM, Ha SY, Jang M, Rani M, Hong S, Yeo GY. 2014. Levels and profiles of persistent organic pollutants in resident and migratory birds from an urbanized coastal region of South Korea. *Sci of the Total Environ.* 470-471: 1463-1470.
- Heinz GH, Hoffman DJ. 2004. Mercury

- accumulation and loss in mallard eggs. Environ Toxicol Chem. 23(1): 222-224.
- Hwang DW, Kim SG, Choi MK, Lee IS, Kim SS, Choi HG. 2016. Monitoring of trace metals in coastal sediments around Korean Peninsula. Marine Pollut Bull. 102: 230-239.
- Islam MM, Bang S, Kim KW, Ahmed MK, Jannat M. 2010. Heavy metals in frozen and canned marine fish of Korea. J Sci Res. 2(3): 549-557.
- Kim JS, Han SH, Lee DP, Koo TH. 2001. Heavy metal contamination of feral pigeons *Columba livia* by habitat in Seoul. Korean J Ecol. 24(5): 303-307.
- Kim JS, Koo TH. 2008. Heavy metal concentrations in feathers of Korean shorebirds. Arch Environ Contam Toxicol 55: 122-128.
- Kim JS, Lee DP, Koo TH. 2003. Monitoring of heavy metal contaminations using feathers of feral pigeons *Columba livia* in Seoul, Korean J Ecol. 26(3): 91-96.
- Kim SJ, Lee JN, Lee DP. 2006. Cadmium and lead levels of loons wintering in Korea. J Ecol Field Biol. 29(6): 539-543.
- Kim JS, Oh JM. 2012. Monitoring of heavy metal contaminants using feathers of shorebirds, Korea. J Environ Monit. 14: 651-656.
- Kim JS, Oh JM. 2014. Heavy metal concentrations in Black-tailed Gull (*Larus crassirostris*) chicks, Korea. Chemosphere. 112: 370-376.
- Kim JS, Oh JM. 2015. Comparison of trace element concentrations between chick and adult Black-tailed Gull (*Larus crassirostris*). Bull Environ Contam Toxicol. 94: 727-731.
- Kim JS, Shin JR, Koo TH. 2009. Heavy metal distribution in some wild birds from Korea. Arch Environ Contam Toxicol. 56: 317-324.
- Klein R, Bartel-Steinbach M, Koschorreck J, Paulus M, Tarricone K, Teubner D, Wagner G, Weimann T, Veith M. 2012. Standardization of egg collection from aquatic birds for biomonitoring - a critical review, Environ Sci & Tech. 1-40.
- Koster MD, Ryckman DP, Weseloh DVC, Struger J. 1996. Mercury levels in great lakes herring gull (*Larus argentatus*) eggs, 1972-1992. Environ Pollut. 93(3): 261-270.
- Kwon YS, Lee WS, Yoo JC. 2006. Clutch size and breeding success of Black-tailed Gull (*Larus crassirostris*) at Hongdo Island, southeast coast of South Korea. Ocean and Polar Res. 28(2):2 01-207.
- Lee DP, Honda K, Tatsukawa R. 1987. Comparison of tissue distributions of heavy metals in birds in Japan and Korea. Yamashina Inst Ornith. 19: 103-116.
- Lee WS, Koo TH, Park JY. 2000. A field guide to the birds of Korea. LG Evergreen Foundation, Korea.
- Lee J, Lee J, Lee SH, Kim M, Lee E, Han A, Shim K. 2014. The characteristics of heavy metal accumulations in feral pigeon (*Columba livia*) feathers for environmental monitoring, J Environ Impact Assess. 23(6): 492-504.
- Lewis SA, Becker PH, Furness RW. 1993. Mercury levels in eggs, tissues, and feathers of Herring Gulls *Larus argentatus* from the German Wadden sea coast. Environ Pollut. 80: 293-299.
- Luo W, Lu Y, Wang T. 2010. Ecological risk assessment of arsenic and metal in sediments of coastal areas of northern

- Bohai and Yellow Seas, China. *AMBIO*. 39: 367-375.
- Morera M, Sanpera C, Crespo S, Jover L, Ruiz X. 1997. Inter- and intra clutch variability in heavy metals and selenium levels in Audouin's Gull eggs from the Ebro Delta, Spain. *Arch Environ Contam Toxicol*. 33: 71-75.
- Morales L, Martrat MG, Olmos J, Parera J, Vicente J, Bertolero A, Ábalos M, Lacorte S, Santos FJ, Abad E. 2012. Persistent organic pollutants in gull eggs of two species (*Larus michabellis* and *Larus audouinii*) from the Ebro delta Natural Park. *Chemosphere*. 88: 1306-1316.
- Nagel P, Smrekar G, Haag-Wackernagel D. 2001. Use of feral pigeon eggs for urban biomonitoring. *Fresenius Environ Bul*. 10(1): 18-25.
- Nam DH, Lee DP, Koo TH. 2001. Factors causing variations of lead and cadmium accumulation of feral pigeons (*Columba livia*). *Korean J Ornithol*. 8(2): 107-115.
- Nam DH, Lee DP, Koo TH. 2002. The use of feral pigeon's (*Columba livia*) feathers as a monitor for lead pollution in Korea. *Korean J Environ Ecol*. 16(3): 233-238.
- Nam DH, Lee DP, Koo TH. 2003. Comparison of lead and cadmium accumulations in feral pigeons (*Columba livia*) with different developmental stages from urban and industrial complex areas, *Korean J Environ Biol*. 21(2), 142-148.
- Nisianakis P, Giannenas I, Gavriil A, Kontopidis G, Kyriazakis I. 2009. Variation in trace element contents among chicken, turkey, duck, goose, and pigeon eggs analyzed by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS). *Biol Trace Elem Res*. 128: 62-71.
- Park JS, Jung SY, Son YJ, Choi SJ, Kim MS, Kim JG, Park SH, Lee SM, Chae YZ, Kim MY. 2017. Total mercury, methylmercury and ethylmercury in marine fish and marine fishery products sold in Seoul, Korea. *Food Additives & Contaminants: Part B*. 4(4): 268-274.
- Parsons J. 1970. Relationship between egg size and post-hatching chick mortality in the Herring Gull (*Larus argentatus*). *Nature*. 228: 1221-1222.
- Parsons J. 1976. Factors determining the number and size of eggs laid by the Herring Gull. *The Condor*. 78:481-492.
- Paulus M, Bartel M, Klein R, Quack M, Tarricone K, Teubner D, Wagner G. 2010. Guideline for sampling and sample treatment, Herring Gull (*Larus argentatus*). version 2.0.3. Umweltprobenbank.
- Rajaei F, Esmaili SA, Bahramifar N, Ghasempouri SM, Savabieasfahani M. 2010. Mercury concentration in 3 species of gull *Larus ridibundus*, *Larus minutus*, *Larus canus* from south coast of the Caspian Sea, Iran. *Bull Environ Contam Toxicol*. 84(6): 716-719.
- Royle NJ, Surai PF, McCartney RJ, Speake BK. 1999. Parental investment and egg yolk lipid composition in gulls. *Funct Ecol*. 13: 298-306.
- Rudel H, Uhlig S, Weingartner M. 2008. Pulverisation and homogenisation of environmental samples by cryomilling. Fraunhofer Institute, Germany.
- Rudel H, Fließner A, Kisters Jan. 2010. Twenty years of elemental analysis of marine biota within the German Environmental Specimen Bank—a thorough look at the data. *Environ Sci Pollut Res*. 17:1025-

- 1034.
- Ruiz X, Jover L, Pedrocchi V, Oro D, González-Solís J. 2000. How costly is clutch formation in the audouin's gull *Larus audouinii*? J of Avian Biol. 31: 567-575.
- Sagerup K, Helgason LB, Polder A, Strøm H, Josefsen TD, Skåre JU, Gabrielsen GW. 2009. Persistent organic pollutants and mercury in dead and dying glaucous gulls (*Larus hyperboreus*) at Bjørnøya (Svalbard). Sci of the Total Environ. 407: 6009-6016.
- Saino N, Romano M, Rubolini D, Caprioli M, Ambrosini R, Fasola M. 2010. Food supplementation affects egg albumen content and body size asymmetry among yellow-legged gull siblings. Behav Ecol Sociobiol. 64:1813-1812.
- Sanpera C, Morera M, Crespo S, Ruiz X, Jover L. 1997. Trace elements in clutches of Yellow-legged Gulls, *Larus cachinnans*, from the Medes Islands, Spain. Bull Environ Contam. Toxicol. 59:757-762.
- Sanpera C, Morera M, Ruiz X, Jover L. 2000. Variability of mercury and selenium levels in clutches of Audouin's Gulls (*Larus audouinii*) breeding at the Chafarinas Islands, Southwest Mediterranean. Arch Environ Contam Toxicol. 39: 119-123.
- Salzer DW, Larkin GJ. 1990. Impact of courtship feeding on clutch and third-egg size in glaucous-winged gulls. Anim Behav. 39(6): 1149-1162.
- Shin JR, Kim JS, Koo TH. 2008. Lead and cadmium concentrations in Korean wild birds. Korean J Environ Biol. 26(1): 8-14.
- Szumilo E, Fila G, Szubska M, Meissner W, Beldowska M, Falkowska L. 2010. Distribution of total mercury in Herring Gull (*Larus argentatus*) from the vicinity of the Gulf of Gdansk, Poland. Oceanol and Hydrobiol Stud. 105-114.
- Won BO. 1981. Illustrated flora & fauna of Korea, vol. 25, avifauna. Ministry of Education.
- Yu JP, Chun BS, Kim IK, Kang JH. 2006. Hatching and livability of the Black-tailed Gull (*Larus crassirostris*) in relation to the egg size in Hongdo Island. Kor J Orni. 13(1): 21-26.
- Yoo JC, Kwon YS. 1997. Some aspects of laying, incubation and hatching in the Black-tailed Gull, *Larus crassirostris*. Kor J Orni. 4(1): 1-5.

Appendix 1. The list of sample types and pollutants analyzed in Korean wild birds

English name*	Scientific name**	Samples	Mercury	Heavy metals	Organic pollutants	Reference
Black-tailed gull	<i>Larus crassirostris</i>	Egg		5 (Pb, Cd)	-	Kim & Oh 2014
Feral Pigeon	<i>Columba livia</i>			Pb, Cd	POPs†	Choi et al. 2001a§
Black-tailed gull	<i>Larus crassirostris</i>	Liver	-	5 (Pb, Cd)		Nam et al. 2003
Great egret	<i>Egretta alba</i>	Feathers		6 (Pb, Cd)		Lee et al. 2014
Japanese lesser sparrowhawk	<i>Accipiter gularis</i>			8 (Pb, Cd)		Kim & Oh 2014
Common buzzard	<i>Buteo buteo</i>			7 (Pb, Cd)		Kim & Oh 2015
Dunlin	<i>Calidris alpina</i>					Honda et al. 1986
Great egret	<i>Egretta alba</i>					
Common kestrel	<i>Falco tinnunculus</i>					
Grey-tailed tattler	<i>Heteroscelus brevipes</i>		0			
Eurasian scops owl	<i>Otus scops</i>			Internal organs **, feathers	6 (Pb, Cd)	
Black-tailed magpie	<i>Pica pica</i>					
Greenshank	<i>Tringa nebularia</i>					
Grey-backed thrush	<i>Turdus hortulorum</i>					
Pale thrush	<i>Turdus pallidus</i>					
Terek sandpiper	<i>Xenus cinereus</i>					
White's thrush	<i>Zoothera dauma</i>					
Feral Pigeon	<i>Columba livia</i>		-	5 (Pb, Cd)		Lee et al. 2014
Feral Pigeon	<i>Columba livia</i>			6 (Pb, Cd)		Kim et al. 2001
Arctic loon	<i>Gavia arctica</i>					
Pacific loon	<i>Gavia pacifica</i>			Pb, Cd		Kim et al. 2006
Red-throated loon	<i>Gavia stellata</i>					
Japanese lesser sparrowhawk	<i>Accipiter gularis</i>			4 (Pb, Cd)		Kim et al. 2009
Cinereous vulture	<i>Aegypius monachus</i>	Internal organs	-			

*, **, †: The names follow "A field guide to the birds of Korea" (Lee et al. 2000).

‡: The number of heavy metals including Pb and Cd, §: Persistent organic pollutants, ¶: Hokkaido of Japan, **: Liver, kidney and etc..

Appendix 1. (Continued) The list of sample types and pollutants analyzed in Korean wild birds

English name*	Scientific name**	Samples	Mercury	Heavy metals	Organic pollutants	Reference
Mallard	<i>Anas platyrhynchos</i>	Internal organs**	-	4*(Pb, Cd)	-	Kim et al. 2009
Spot-billed duck	<i>Anas poecilorhyncha</i>					
White-fronted goose	<i>Anser albifrons</i>					
Grey heron	<i>Ardea cinerea</i>					
Cattle egret	<i>Bubulcus ibis</i>					
Common buzzard	<i>Buteo buteo</i>					
Great egret	<i>Egretta alba</i>					
Little egret	<i>Egretta garzetta</i>					
Intermediate egret	<i>Egretta intermedia</i>					
Tristram's bunting	<i>Emberiza tristrami</i>					
Common kestrel	<i>Falco tinnunculus</i>					
Bull-headed shrike	<i>Lanius bucephalus</i>					
Black-crowned night heron	<i>Nycticorax nycticorax</i>					
Black-tailed magpie	<i>Pica pica</i>					
Rufous turtle dove	<i>Streptopelia orientalis</i>					
Ancient murrelet	<i>Synthliboramphus antiquus</i>					
Siberian thrush	<i>Zoothera sibirica</i>					
Feral Pigeon	<i>Columba livia</i>					
Feral Pigeon	<i>Columba livia</i>					
Japanese lesser sparrowhawk	<i>Accipiter gularis</i>					
Cinereous vulture	<i>Aegypius monachus</i>					
Mallard	<i>Anas platyrhynchos</i>					
Spot-billed duck	<i>Anas poecilorhyncha</i>					
White-fronted goose	<i>Anser albifrons</i>					
Grey heron	<i>Ardea cinerea</i>					
Cattle egret	<i>Bubulcus ibis</i>					
Common buzzard	<i>Buteo buteo</i>					
				Pb, Cd		Nam et al. 2001 [§] Nam et al. 2003
						Shin et al. 2008

*. **: The names follow "A field guide to the birds of Korea" (Lee et al. 2000).

†: The number of heavy metals including Pb and Cd. *: Liver, kidney and etc.; §: Kidney and bone.

Appendix 1. (Continued) The list of sample types and pollutants analyzed in Korean wild birds

English name*	Scientific name**	Samples	Mercury	Heavy metals	Organic pollutants	Reference
Great egret	<i>Egretta alba</i>	Internal organs**	-	Pb, Cd		Shin et al. 2008
Little egret	<i>Egretta garzetta</i>					
Intermediate egret	<i>Egretta intermedia</i>					
Tristram's bunting	<i>Emberiza tristrami</i>					
Common kestrel	<i>Falco tinnunculus</i>					
Bull-headed shrike	<i>Lanius bucephalus</i>					
Black-crowned night heron	<i>Nycticorax nycticorax</i>					
Black-tailed magpie	<i>Pica pica</i>					
Rufous turtle dove	<i>Streptopelia orientalis</i>					
Ancient murrelet	<i>Synthliboramphus antiquus</i>					
Siberian thrush	<i>Zoothera sibirica</i>					
Dunlin	<i>Calidris alpina</i>					
Great knot	<i>Calidris tenuirostris</i>					
Kentish plover	<i>Charadrius alexandrinus</i>					
Mongolian plover	<i>Charadrius mongolus</i>					
Terek sandpiper	<i>Xenus cinereus</i>					
Red-necked stint	<i>Calidris ruficollis</i>					
Great knot	<i>Calidris tenuirostris</i>					
Terek sandpiper	<i>Xenus cinereus</i>					
Feral Pigeon	<i>Columba livia</i>	Feathers	5 (Pb, Cd)	6 (Pb, Cd)		Kim et al. 2003
Feral Pigeon	<i>Columba livia</i>					Pb

* **: The names follow "A field guide to the birds of Korea" (Lee et al. 2000).

** : Liver, kidney and etc. † : The number of heavy metals including Pb and Cd.

Appendix 1. (Continued) The list of sample types and pollutants analyzed in Korean wild birds

English name*	Scientific name**	Samples	Mercury	Heavy metals	Organic pollutants	Reference
Black-tailed gull	<i>Larus crassirostris</i>	Subcutaneous fat	-	-	POPs†	Choi et al. 2001a†
Black-tailed gull	<i>Larus crassirostris</i>					
Great knot	<i>Calidris tenuirostris</i>					
Sanderling	<i>Crocechia alba</i>					
Herring gull	<i>Larus argentatus</i>					
Common gull	<i>Larus canus</i>					
Black-headed gull	<i>Larus ridibundus</i>					
Bar-tailed godwit	<i>Limosa lapponica</i>					
Black-necked grebe	<i>Podiceps nigricollis</i>					
Little tern	<i>Sterna albifrons</i>					
Common tern	<i>Sterna hirundo</i>					
Greenshank	<i>Tringa nebularia</i>					
Black-tailed gull	<i>Larus crassirostris</i>					
Grey heron	<i>Ardea cinerea</i>					
Feral pigeon	<i>Columba livia</i>					
Great egret	<i>Egretta alba</i>					
Little egret	<i>Egretta garzetta</i>					
Pacific loon	<i>Gavia pacifica</i>					

*. **. The names follow "A field guide to the birds of Korea" (Lee et al. 2000).

†: Hokkaido of Japan, ‡: Persistent organic pollutants.