

## 소양호 빙어 개체군의 생태적 특성

홍두표<sup>1</sup>, 이재용<sup>2</sup>, 김범준<sup>1</sup>, 최재석<sup>3\*</sup><sup>1</sup>강원대학교 자연과학대학 환경학과 석사과정, <sup>2</sup>(주)자연과 사람 연구원, <sup>3</sup>강원대학교 환경연구소 연구교수Ecological Characteristics of *Hypomesus nipponensis* Populations of Lake SoyangDoupyo Hong<sup>1</sup>, Jaeyong Lee<sup>2</sup>, Bumjun Kim<sup>1</sup>, Jaeseok Choi<sup>3\*</sup><sup>1</sup>MS Student, Department of Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea<sup>2</sup>Nature & Human Co, Wonju 26424, Korea<sup>3</sup>Research Professor, Institute of Environmental Research, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

\*Corresponding author: Jaeseok Choi (E-mail: gobiobotia@kangwon.ac.kr)

## A B S T R A C T

Received: 6 February 2023

Revised: 21 February 2023

Accepted: 27 February 2023

To investigate the ecological characteristics that affect the growth of the *Hypomesus nipponensis* population in Lake Soyang, 615 *H. nipponensis* specimens were collected from the lake and examined 10 times between January and April 2019 and between January and March 2020. In 2019, the total length of Lake Soyang's *H. nipponensis* was  $73.3 \pm 4.7$  mm, and the weight was  $1.9 \pm 0.5$  g. In 2020, the total length was  $64.4 \pm 12.3$  mm, and the weight was  $1.4 \pm 1.3$  g. The individuals collected in 2020 were smaller than those collected in 2019. During the survey period, the growth b values were highest in January and lowest in February, at 3.4 and 2.9, respectively. The obesity K value was negative in three out of four surveys conducted in February. The sex ratio of Lake Soyang's *H. nipponensis* was 1 : 1.93, with males being more numerous, and the average number of females was  $5457.9 \pm 2152.9$ . As previous studies have shown, *Bosmina longirostris*, a tectonic species, accounted for 73% of *H. nipponensis*' diet. The geographical distribution of *H. nipponensis* differed depending on its growth stage. The total length and weight of *H. nipponensis* collected in Bupyeong-ri, upstream of Lake Soyang, were  $74.9 \pm 10.9$  mm and  $2.4 \pm 2.8$  g, respectively. In contrast, specimens collected from Susanna-ri, located downstream, were much smaller, measuring only  $48.1 \pm 7.7$  mm in length and  $0.54 \pm 0.3$  g in weight. This study revealed that the distribution of *H. nipponensis* living in Lake Soyang, which has a long resin-type topography, varies depending on the growth stage. *H. nipponensis* is a cold-water fish species highly sensitive to water temperature changes. Its stocks are distributed throughout the country, including in Gangwon-do, and serve as effective environmental bioindicators. As such, these findings contribute to the understanding of *H. nipponensis* populations and water environments in distribution areas, particularly with regard to the impacts of climate change.

**Keywords:** Dwarfization, Food sources, Geographical distribution, Growth stage, Length-weight relationship



## 서론

빙어는 한국, 중국, 일본에 분포하며 그 외에는 러시아 동부와 미국 서부 일대에 분포한다. 빙어속(*Hypomesus*)에는 전 세계적으로 5종이 있으며 이들 중 부레 전단보다 뒤쪽에 장과 연결된 관이 있는 종은 *Hypomesus olidus*에 해당한다(McAllister, 1963). 한국산 빙어는 보통 부레 전단에서 장으로 연결되어 *Hypomesus olidus*와 차이를 보인다. 척추 골수는 집단별로 큰 차이 없이 대부분 56 - 59개로 확인되었으며(Kim, 1997), 치어 형태와 난 발생 등에 관해서는 Han et al.(1996)에 의해 보고되었다.

한국산 빙어(*Hypomesus nipponensis*)는 바다빙어목(Osmeriformes) 바다빙어과(Osmeridae) 빙어속(*Hypomesus*)에 속하는 어종이다(Byeon, 2010). 몸길이는 10 - 15 cm 정도이며, 등지느러미와 꼬리지느러미 사이에는 기름지느러미가 있고 아가미뚜껑 뒤에서 미병부까지 굽은 세로무늬가 있다(National Institute of Biological Resources, 2012).

빙어(*H. nipponensis*)의 주된 먹이원은 동물플랑크톤에 속하는 지각류(Branchioda)와 요각류(Copepoda)를 포함한 수서곤충(Aquatic insect) 등이다(Chang et al., 2005).

빙어(*H. nipponensis*)는 6 - 12°C 내외의 차가운 냉수를 선호하는 어종으로 수온이 올라가는 하절기가 되면 수심이 깊은 곳으로 이동하여 서식하다가 늦은 가을철 또는 동절기에 중층 및 표층으로 이동하여 먹이활동을 하는 협온성이면서 냉수성 어종이다.

빙어(*H. nipponensis*)는 본래 동해안에 서식하는 회유성 어종이다. 동해안 기수호는 국내 유일의 자연호소로, 자연적인 갯터짐 현상이 발생하는 시기에 해양에서 성장하던 빙어 개체군은 산란을 위해 기수호 내로 회유하고, 이들 기수호를 산란, 번식 및 성장을 위한 장소로 이용한다. 그러나 1925년부터 수산진흥원 주관으로 함경남도 용흥강, 남한의 제천 의림지 그리고 전국의 주요 댐과 저수지에 빙어를 이식·방류하기 시작하였고 이후 국내 연안과 내륙지역에 광범위한 서식분포를 보이고 있다(Choi et al., 1990). 그중 소양호에 서식 분포하는 빙어는 육봉화되어 짧은 생활환을 갖는 개체군이다.

소양호는 1973년에 건설된 사력댐으로 유역 면적은 2,675.3 km<sup>2</sup>이며 최대 저수량은 29억 ton, 평균 저수량은 1.5억 ton, 최대 수심 118 m, 본류 수역은 연중 4°C 이상으로 겨울에도 결빙되지 않는 특징을 지니고 있다(Ministry of Environment, 1983). 소양호 빙어는 소양호가 완공된 후 5년 이내에 도입된 것으로 추정된다.

소양호 빙어(*H. nipponensis*)는 1980년대까지만 해도 한 해 130여 ton이 일본으로 수출될 정도로 지역 어업계의 중요한 소득원이었다. 최근에는 소양호 내수면어업계에서 2016년에 일본 유통업체를 통해 30 ton 가량 1차 가공(훈제 및 튀김)한 상품을 일본에 수출한 바가 있다. 국내에서 동절기는 어업인들에게는 소득원이 없는 비수기로, 빙어는 지역의 빙어축제와 더불어 수출을 통해 내수면 어업인의 소득원으로써 중요한 자원이라 할 수 있다. 최근 빙어 축제 및 대외 수출 등을 통해 지역 경제 활성화에 기여하고 있는 점이 인정받아 중요한 수산자원으로 인식되기 시작하였으나 어획량의 지속적인 감소와 왜소화 현상이 우려되고 있다(Choi et al., 2000).

한국산 빙어(*H. nipponensis*)에 대한 연구는 국외적으로 분류학적 연구와 산란, 발생 및 서식환경별 자원량 등에 관해 지속적으로 이루어진 상태(Katayama et al., 1998; Singh et al., 2015)이며, 국내에서는 지리적인 환경 특성을 달리 하여 서식 분포(회유성 개체군과 육봉형 개체군)하고 있는 빙어(*H. nipponensis*) 개체군의 성장 차이에 대한 연구가 Byeon(2010)에 의해 이루어진 바가 있다. 이를 제외하면 빙어 개체군의 지리학적 분포 특성에 대한 연구는 전무한 상황이다.

이에 본 연구는 소양호에 서식하는 빙어 개체군의 지리적인 분포 차이에 따른 생태적 특성을 연구하여 향후 강원도 지역의 내수면 수산자원의 하나인 빙어에 대한 관리 및 활용방안을 마련하는 기초자료로 제공하는 것을 목적으로 하였다.

## 조사 및 방법

### 조사시기 및 지점

본 연구대상지인 소양호에서 총 13회 소양호 빙어 개체군을 조사하였다(Table 1). 조사지점은 인재군 남면 상수내리(St.1), 신월리(St.2), 부평리(St.3)까지 총 3개 지점을 조사하였다(Fig. 1).

### 조사 방법

본 논문에서 제시한 2008년 1월부터 2009년 12월까지, 그리고 2019년 1월부터 2020년 12월까지의 수질 자료는 물환경정보시스템(Water Environment Information System)에서 공개하는 자료를 인용하였다(<https://water.nier.go.kr/>).

Table 1. Date of investigation

| Number | Date       | Number | Date       |
|--------|------------|--------|------------|
| 1      | 2019-01-18 | 2      | 2019-01-31 |
| 3      | 2019-02-13 | 4      | 2019-03-20 |
| 5      | 2019-03-31 | 6      | 2019-04-04 |
| 7      | 2019-04-15 | 8      | 2019-04-23 |
| 9      | 2020-01-16 | 10     | 2020-01-23 |
| 11     | 2020-02-05 | 12     | 2020-02-29 |
| 13     | 2020-03-11 |        |            |

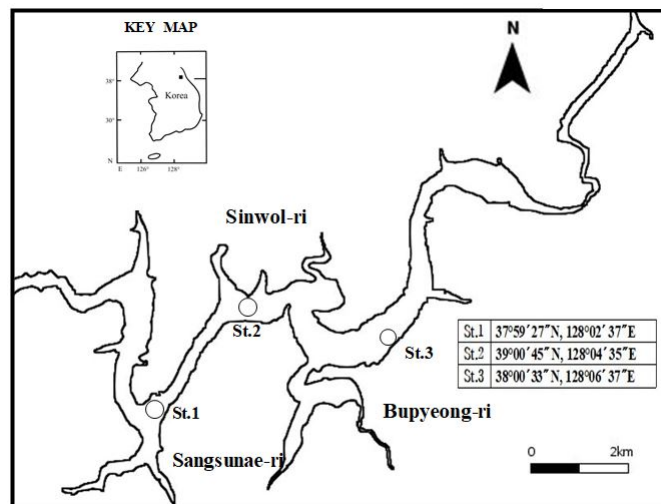


Fig. 1. Map showing studied station of *Hypomesus nipponensis* in Lake Soyang.

빙어 채집을 위해 빙어정치망(5 × 5 mm)을 이용하였으며, 부평리 지역과 상수내리 지역 사이 3개소에서 각각 24시간 설치하여 포획하였다. 이중 2019년 1-3월과 2020년 1-3월에 잡힌 개체들은 모두 전장과 무게를 계측하였고 2019년 4월에 잡힌 개체들은 전장과 무게를 계측하지 않고 성비, 포란수, 위내용물 분석에 사용하였다. 특히 2020년 3월 11일에 상수내리, 신월리, 부평리에서 채집된 201개체는 소양호 내 빙어의 지리적인 종적 분포패턴을 파악하기 위하여 계측하였다. 현장에서 채집한 시료는 실험실로 운반한 후 전장과 무게를 계측하였다.

생식소 성숙도(gonadosomatic index (GSI) : gonad weight/body weight×100)를 구하기 위해 체중 그리고 생식소 무게를 0.01 g까지 측정하여 계측하였으며 암수 구분은 절개 후 생식소로 확인하였다. 포란수는 생식소 성숙도 15% 이상 되는 10개체를 대상으로 육안으로 계수하였다. 성장도는 Pauly(1984)를 비만도는 Anderson and Neumann (1996)을 따랐다.

성장도:  $W = aTL^b$  W: 무게 TL: 전장 a, b: 상수, b = 회귀계수 값

비만도:  $W = cTL + d$  c, d: 상수, C = Condition factor의 기울기

본 연구에서는 빙어의 먹이환경을 파악하기 위해 동물성플랑크톤을 채집하였다. 채집은 네트(망목 63 μm)를 이용하여 수평으로 6 m를 예인하였고 현장에서 폼알데하이드용액(최종 3-4%)으로 고정하여 실험실로 운반 후 광학현미경(Nicon ECLIPSE Ci-L) 하에서 동정하였다. 또한 빙어의 위내용물 분석을 통해 먹이원을 확인하기 위해 2019년 1월 18일, 2019년 2월 13일, 2019년 3월 20일 그리고 2019년 4월 13일 등 4차례에 걸쳐 위 내용물 분석을 수행하였다. 위 내용물은 개체별로 petri dish에 펼친 후 해부현미경(NIKON C-LEDS; ×10, ×20, ×40, ×80)하에서 Yun(1995)에 따라 동정하였다.

## 결과 및 고찰

### 빙어의 시·공간적인 분포

본 연구에서는 2019년 1-3월과 2020년 1-3월에 채집한 빙어 총 615개체를 대상으로 계측하였다(Fig. 2). 2019년부터 2020년까지 소양호 빙어 개체군은 전장이 37 mm - 142 mm로, 85 mm 이상 되는 개체는 매우 적었다. 40 mm - 45 mm, 65 mm - 80 mm에 해당하는 개체수가 풍부하였으며 평균 전장은 65.4(± 12.1) mm이었다. 무게의 경우 0.2 g - 22.4 g 범위로 0.9 g - 1.8 g에 해당하는 개체 비율이 높았으며 평균 무게는 1.6(± 1.2) g이었다. 2019년에 채집된 빙어는 2020년에 채집된 빙어에 비해 평균적으로 전장은 9 mm, 무게는 0.5 g이 더 컸다(Fig. 3).

본 연구에서 2019년과 2020년 소양호 빙어의 계측 결과는 Byeon(2010)이 2008년과 2009년에 계측한 결과와 차이를 보였다. Byeon(2010)의 계측 결과, 소양호 빙어의 평균 전장은 79.5 mm이었는데 이는 본 연구에서 계측한 65.4(± 12.1) mm에 비해 14 mm 이상 큰 수치였다.

소양호 빙어가 과거에 비해 왜소화되는 원인은 직접적으로 빙어의 먹이원에 대한 질적 또는 양적인 차이가 있으며 간접적으로는 소양호의 수리수문학적 특성과 소양호 상류유역의 고랭지 경작지에서 발생하는 탁수의 영향이 관여하기 때문으로 판단된다. 실제적으로 연강수량은 2019년(923.2 mm)에 비해 2020년(1,550.9 mm)로 약 60% 정도 많았다(Meteorological Administration; <https://www.weather.go.kr/>). 그 결과, 2019년과 달리 2020년 소양호 빙어 개체군의 왜소화는 중층으로 유입된 높은 농도의 탁수로 인한 영향이 먹이환경의 악화로 이어진 결과로 판단된다.

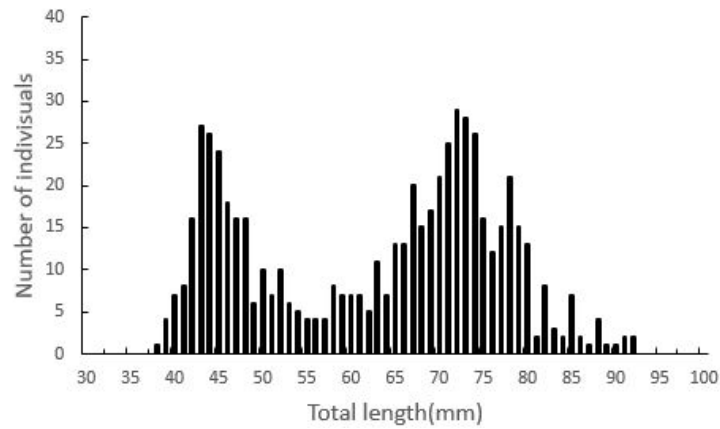


Fig. 2. Length frequency distributions of *Hypomesus nipponensis* in Lake Soyang from February to March 2019 and February to March 2020.

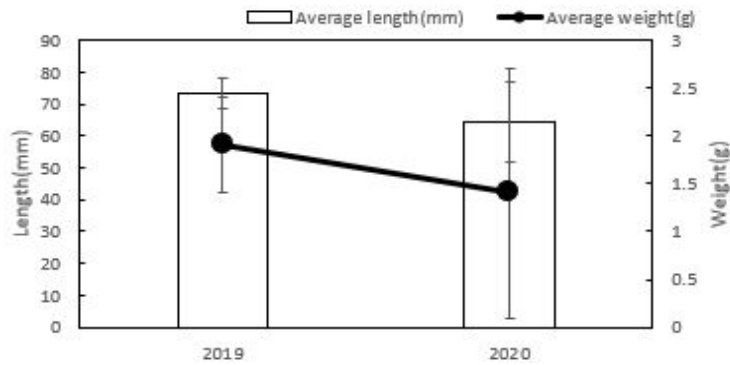


Fig. 3. Comparison of average length ( $\pm$ SD) and weight ( $\pm$ SD) of *Hypomesus nipponensis* collected in 2019 and 2020.

소양호 빙어의 왜소화는 먹이환경과 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다(Byeon, 2010; Chang et al., 2005; Oh et al., 2019). 일반적으로 인공호에 육봉화된 빙어는 동해안 석호에 서식하는 소하성 빙어에 비해 전장 및 무게가 작다 (Katayama et al., 2007). Katayama et al.(2007)은 일본에서 빙어(*H. nipponensis*)의 서식환경(육봉형과 소하성)에 따라 두 가지 크기 형태로 빙어 개체군을 구분할 수 있으며 소하성 빙어는 체형이 큰 반면, 육봉형 빙어는 작은 크기를 보인다는 사실을 확인했다. Byeon(2010) 또한 국내 담수호(소양호)와 기수호(향호)를 대상으로 빙어의 생태적 특성 연구를 통해 소하성 빙어는 육봉형 빙어에 비해 개체의 크기가 크고, 보다 큰 동물성클랑크톤을 주 먹이원으로 함을 보인 바가 있다. 이와 같은 가정은 본 연구에서도 확인되었는데, 소양호와 동해안 석호에 서식하는 빙어의 평균 전장과 무게는 뚜렷한 차이가 있음을 확인하였다. 2007년 조사한 석호 빙어 개체군은 각각 향호에서  $109.27 \pm 13.76$  mm,  $9.65 \pm 3.54$  g, 광포호에서  $110.08 \pm 5.56$  mm,  $8.86 \pm 1.77$  g, 매호에서  $90.98 \pm 12.74$  mm,  $4.39 \pm 2.57$  g, 송지호에서  $108.03 \pm 7.04$  mm,  $8.16 \pm 1.80$  g, 영랑호에서  $101.86 \pm 3.82$  mm,  $5.04 \pm 1.26$  g 그리고 화진포에서  $99.13 \pm 22.24$  mm,  $6.95 \pm 2.89$  g의 범위를 보여 본 연구의 계측 결과인 전장  $65.4(\pm 12.1)$  mm와 무게  $1.6(\pm 1.2)$  g 보다 높은 값을 보였다(Fig. 4; Choi, unpublished materials).

Byeon(2010)은 소양호 빙어의 먹이원은 *Bosmina* 등의 지각류 비율이 높은 반면, 석호인 향호에서는 크기가 1.2 mm에 달하는 *Eodiaptomus* 같은 요각류가 먹이원의 85.4%를 차지함을 비교 분석한 바가 있다. 결론적으로, 소양호에 서식하는 빙어 개체군의 왜소화는 석호에 서식하는 빙어 개체군에 비해 먹이의 질적 또는 양적인 환경이 좋지 않아

나타나는 현상으로 판단된다.

본 연구에서는 소양호 내 지리적으로 다른 지역에 위치하는 상수내리, 신월리 그리고 부평리에서 채집된 202개체를 대상으로 전장을 계측했다. 그 결과, 소양호에서는 빙어 개체군이 성장단계(전장 크기)에 따라 지리적으로 분포지역을 달리하는 것으로 파악되었다(Fig. 5).

상류인 부평리에서 채집된 개체군의 전장은 60 mm - 90 mm로, 70 mm - 79 mm에 해당하는 개체수가 풍부하였으며 평균 전장은 74.9(± 10.9) mm, 평균 무게는 2.4(± 2.8) g으로 1년생 개체군이었다. 중류인 신월리에서 채집된 개체군의 전장은 39 mm - 82 mm이었고, 65 mm - 82 mm에 해당하는 개체수가 풍부하였으며 평균 전장은 67.5(± 10.3) mm, 평균 무게는 1.6(± 0.5) g으로 당년생과 1년생 개체들이 혼재해 있었다. 그리고 하류인 상수내리에서 채집된 개체군의 전장은 38 mm - 69mm로, 42 mm - 50 mm에 해당하는 개체수가 풍부하였으며 평균 전장은 48.1(± 7.7) mm, 평균 무게는 0.54(± 0.3) g으로 대부분이 당년생 개체들이었다(Fig. 6).

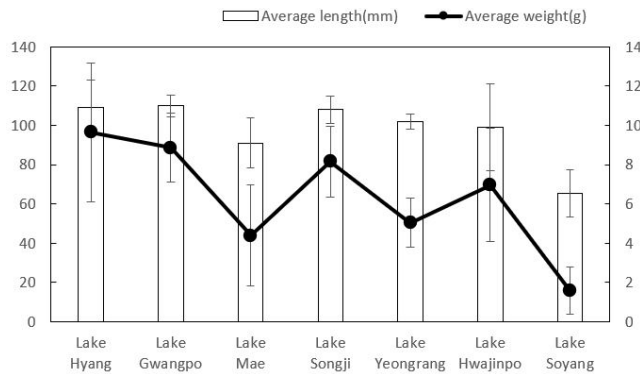


Fig. 4. Comparison of average length (±SD) and weight (±SD) of smelt (*Hypomesus nipponensis*) appearing in the East Coast lagoons (Lake Hyang, Lake Gwangpo, Lake Mae, Lake Songji, Lake Yeongrang, Lake Hwajinpo) in 2007 and in Lake Soyang (Inje-gun) in 2019 and 2020 (Choi, unpublished materials).

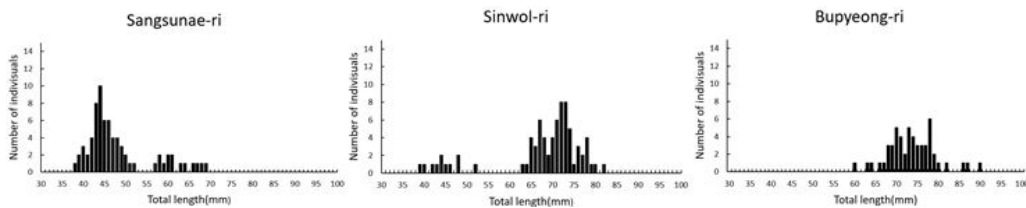


Fig. 5. Length frequency distributions of *Hypomesus nipponensis* in Sangsunae-ri and Sinwol-ri and Bupyeong-ri.

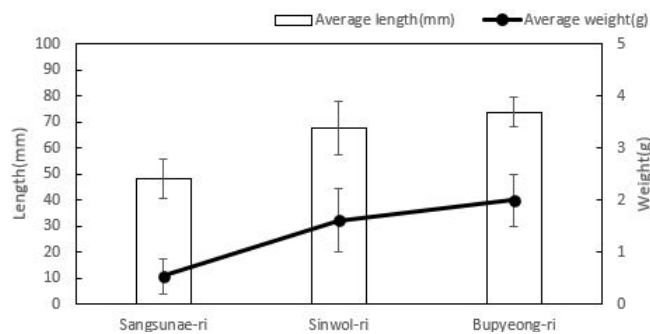


Fig. 6. Comparison of average length (±SD) and weight (±SD) of *Hypomesus nipponensis* in Sangsunae-ri, Sinwol-ri, Bupyeong-ri.

최근까지 빙어 개체군이 성장단계별로 특정 지역에서 무리를 이루는 특성을 언급한 연구는 없었다. 기존에 알려진 빙어의 지리적인 이동 분포의 원인 중 하나로, 성장단계별 수온변화에 따른 분포 특성이 고려될 수 있으며(Power and Attrill, 2007) 조사 시기가 산란 시기에 해당하므로 산란에 따른 생태적 분포 차이로 보인다.

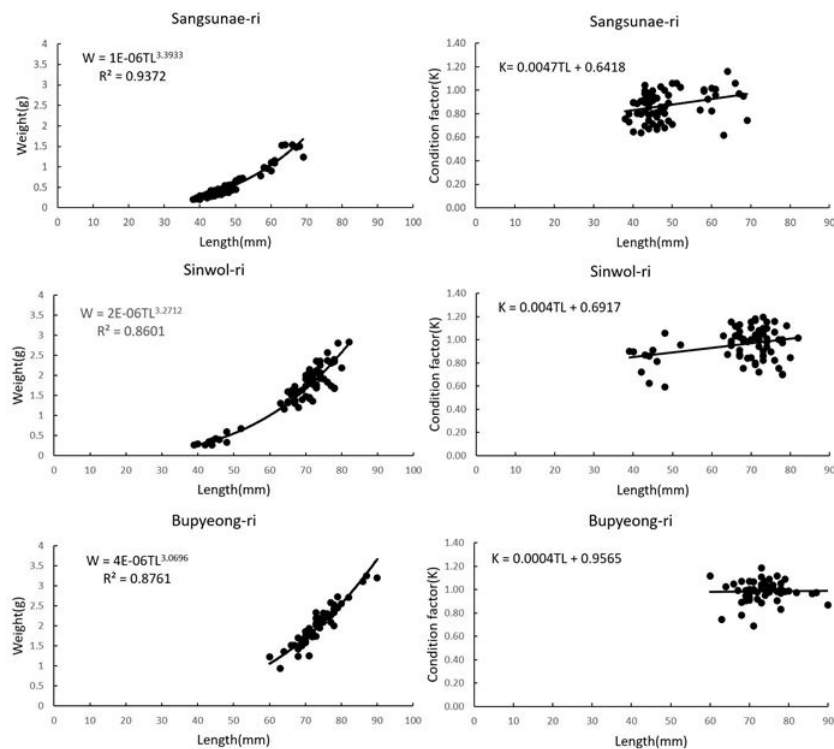
**성장도 및 비만도**

시기별 빙어의 생육상태를 파악하기 위해 성장도와 비만도를 조사하였다. 1월의 평균 성장도 b값은 3.4로 가장 양호하였고, 2월은 평균 성장도 b값이 2.9로 가장 낮았다(Table 2). 1월에는 비만도 K값이 음(-)인 적이 없었지만 2월에는 4번의 조사 시기 중 3번이 음(-) K값이었으며 3월에는 3번의 조사 시기 중 1번만이 음(-) K값이었다. 이와 같이 2월에 비만도가 음의 K값을 보인 이유는 이 시기가 산란기에 해당하기 때문으로 사료된다.

조사 지점에 따른 비교 분석 결과, 소양호 상류에 위치하는 부평리에서 채집된 개체들의 성장도 b값(3.0)은 가장 낮았지만 비만도 K(0.95)값은 가장 양호했다(Fig. 7). 중류 지점인 신월리에서 채집된 개체들은 b값(3.2), K값(0.69) 모

**Table 2.** Comparison of length-weight relationship and condition factor analysis (mean ± SD) of *Hypomesus nipponensis* in Lake Soyang

| 2019                   | 18-Jan.         | 31-Jan.         | 13-Feb.         | 20-Mar.          | 31-Mar.         |
|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|
| Length-weight (b)      | 3.5             | 3.3             | 2.7             | 2.6              | 3.3             |
| Conditional factor (k) | 0.0064TL+0.5242 | 0.0037TL+0.7171 | -0.0029TL+1.235 | -0.0061TL+1.4744 | 0.0104TL+0.1548 |
| 2020                   | 16-Jan.         | 23-Jan.         | 5-Feb.          | 29-Feb.          | 11-Mar.         |
| Length-weight (b)      | 3.4             | 3.5             | 2.9             | 3.1              | 3.3             |
| Conditional factor (K) | 0.0068TL+0.6435 | 0.009TL+0.4434  | -0.0005TL+1.02  | 0.0028TL+0.7019  | 0.0029TL+0.8341 |



**Fig. 7.** Length-weight relationship and condition factor analysis for *Hypomesus nipponensis* in Sangsunae-ri, Sinwol-ri, and Bupyeong-ri on March 11, 2020.

두 중간값을 보였으며 하류 지점인 상수내리에서 채집된 개체들의 경우 성장도 b값(3.3)은 가장 높았지만 비만도 K값(0.64)은 가장 낮은 값을 보였다.

지점별 전장-무게 관계식을 비교 분석 결과, 소양호 빙어는 산란시기와 밀접한 관련성을 보이니, 성장단계에 따른 지리적인 분포를 달리하는 빙어 개체군 사이의 지점별 성장도 및 비만도는 큰 차이를 보이지 않았다.

## 위 내용물 분석

2020년 2월 26일 소양호의 동물성플랑크톤 군집을 조사한 결과 총 6종이 나타났다(Nauplius, *Conochiloides coenobasis*, *Diurella porcellus*, *Keratella cochlearis*, *Polyarthra vulgaris*, *Voticella* sp.). 동절기 소양호의 표층에서의 동물플랑크톤 군집구조는 소형동물플랑크톤이 우세한 군집으로, 윤충류가 우점을 하였다(Table 3).

일반적으로, 빙어는 성장에 따라 치어기에는 소형동물플랑크톤을 섭식하나 성장한 개체는 대형동물플랑크톤으로 먹이전환을 한다(Degraaf, 1986). Chang et al.(2005)은 일본 Suwa호에 서식하는 빙어의 위 내용물을 분석한 결과, 지각류(*Bosmina fatalis*)와 요각류(*Eodiaptornus jaenicus*)가 빙어(*H. nipponensis*) 먹이원의 약 80%를 점유함 보였고 크기에 대한 선택성을 가질 수 있음을 언급한 바가 있다. Oh et al.(2019)은 일본 Suwa호에 서식하는 빙어의 대량 폐사 이후 대형동물플랑크톤인 *Daphnia galeata*가 동물플랑크톤 군집 내 점유율이 증가하는 양상을 확인하였다. 빙어(*H. nipponensis*) 개체군이 회복된 이후에는 소형동물플랑크톤의 점유율이 증가함을 파악하고, 빙어 개체군의 크기가 동물플랑크톤 군집의 구조적인 변화에 직접적인 영향을 미침을 보였다.

소양호에 서식하는 빙어 개체군의 섭이특성을 검토하기 위해 2019년 1월부터 4월까지 소양호에서 채집된 빙어 중 61개체에 대해 위 내용물을 분석하였다. 조사 기간 빙어의 위 내용물 조사 결과 본 연구에서는 총 5종류가 나타났으며, 빙어의 먹이원은 동물플랑크톤인 지각류와 윤충류 그리고 원생동물인 것으로 나타났다. 이 중 중형동물플랑크톤

**Table 3.** Abundance of zooplankton community on February 26, 2020, and stomach contents of *Hypomesus nipponensis* from January to April 2019 in Lake Soyang

| Category                        | No. of individual in lake | Stomach content | Ra(%) |
|---------------------------------|---------------------------|-----------------|-------|
| Branchioda                      |                           |                 |       |
| <i>Bosmina longirostris</i>     |                           | 331             | 73.0  |
| <i>Chydorus gibbus</i>          |                           | 1               | 0.2   |
| Copepoda                        |                           |                 |       |
| <i>Nauplius</i>                 | 0.6                       |                 |       |
| Rotifera                        |                           |                 |       |
| <i>Ascomorpha ovalis</i>        |                           | 1               | 0.2   |
| <i>Chydorus gibbus</i>          |                           | 1               | 0.2   |
| <i>Conochiloides coenobasis</i> | 0.6                       |                 |       |
| <i>Keratella cochlearis</i>     | 0.3                       | 117             | 25.8  |
| <i>Polyarthra vulgaris</i>      | 7.8                       |                 |       |
| Protozoa                        |                           |                 |       |
| <i>Ceratium hirundinella</i>    |                           | 3               | 0.6   |
| <i>Voticella</i> sp.            | 5.8                       |                 |       |
| Number of species               | 5                         | 6               | 100.0 |
| Standing crop (ind./L)          | 15                        | 454             |       |



인 *Bosmina longirostris*(73%)가 먹이원의 대부분을 차지하였고 다음은 소형동물플랑크톤인 *Keratella cochlearis* (25.8%)이었다. 소양호 빙어는 상대적으로 크기가 큰 지각류(평균 350 μm 전후)를 먹이원으로 선호하는 결과를 얻었다. Byeon(2010)의 위 내용물 분석 결과 역시 빙어의 주요 먹이원은 *Bosmina longirostris*(79.9%)로, 이는 본 연구의 결과와 일치하였다(Chang et al., 2005; Oh et al., 2019).

비록 본 연구에서 소양호 동물플랑크톤 군집내 요각류의 출현은 없었지만, 그럼에도 불구하고 빙어의 위 내용물 분석 결과, 동절기에 지각류인 *Bosmina longirostris*는 빙어의 먹이원으로써 가장 선호되는 먹이원이다. 이는 동물플랑크톤의 일주기 특성에 따른 수직분포 수층 또는 빙어에 의한 포식압의 영향 때문으로 사료된다. 대부분의 이동성이 큰 동물플랑크톤은 주간에는 표층에 비해 깊은 수심에서 시야에 의존하여 포식하는 어류의 포식압을 피해 이동 분포하고 어류의 포식압이 감소하는 야간에 표층으로 이동하여 먹이활동을 한다(Appenzeller and Leggett, 1995; Bandara et al., 2021).

빙어는 지각류를 주요 먹이원으로 하는 냉수성 어종으로 알려져 있다(Chang et al., 2005; Oh et al., 2019; Yoshioka and Wada, 1994). 몬순기후 지역이면서 일순환 온대호소인 소양호는 댐앞 100 m 수심을 갖고 있고 수직적으로 수층에 따른 수온 차이가 큰 대형호소이다. 따라서 소양호에서는 육봉화된 냉수성 어종인 빙어의 경우, 여름에는 수온이 높은 표층을 피하여 수온이 낮은 수층에 무리를 이루어 분포한다. 반면, 동물플랑크톤은 일주기를 통해 수온이 높은 유광대에 주로 분포하며 이 시기에는 대형동물플랑크톤인 *Daphnia galeata*가 상층부에서 급번성하여 소양호에서 청수기가 형성되는 시기이다(Kim et al., 2019).

### 수환경

빙어의 전장 및 무게 감소로 인한 왜소화 현상은 표층 수질환경변화로 인한 영향이 원인이라 볼 수 없었다. 소양호의 수질환경은 지난 10여 년 사이에 큰 변화를 겪지 않았다(Table 4). 오히려 빙어의 크기가 왜소화된 원인으로 소양호의 수리수문학적 특성과 빙어의 분포 수심과의 관련성이 클 것으로 판단된다.

상류 유역에 있는 고령지로부터의 탁수발생의 영향을 직접적으로 받고 있는 소양호의 수리수문학적 특성과 수온에 대한 빙어의 특이성 때문에 빙어의 왜소화 및 개체군 크기는 더욱 열악해지는 것으로 판단된다. 상류 해안면 유역에서 발생하는 탁수는 주로 몬순강우 시기에 발생하며, 하천의 수온과 댐 내 수온이 일치하는 수층으로 관입한 후 댐 앞 중층 방류구를 통해 하류하천으로 방류된다. 이 시기에 빙어 개체군은 주로 수심 15 m 전후의 수심에 제한적으로 분포하고 수온이 낮아지는 늦가을과 겨울에는 표층으로 이동 서식하는 것으로 알려져 있다. 몬순강우 시기에 소양호 내로 유입되는 탁수와 빙어가 서식하는 수층이 거의 일치하기 때문에 탁수 유입은 시각에 의존하는 빙어의 먹이활동을 저해하는 요인으로 작용하기에 충분하다. 탁수는 강도에 따라 어류의 질식사 및 철과상 유발(Chapman, 1988),

**Table 4.** Comparative analysis of water quality items in Lake Soyang (mean ± SD) from January 2019 to December 2020 and from January 2008 to December 2009

| Items Station                   | WT (°C)                 | COD (mg/L)            | SS (mg/L)              | T-N (mg/L)            | T-P (mg/L)                  | Conductivity (μS/cm)   | chlorophyll a (mg/m <sup>3</sup> ) |
|---------------------------------|-------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------------------|------------------------------------|
| Lake Soyang (2019.01 - 2020.12) | 11.8 ± 5.2 (3.0 - 23.1) | 2.1 ± 1.4 (1.5 - 4.2) | 2.1 ± 1.5 (0.2 - 18.6) | 2.1 ± 0.2 (1.7 - 2.7) | 0.01 ± 0.006 (0.002 - 0.06) | 80.3 ± 9.7 (43 - 111)  | 1.8 ± 1.8 (0.1 - 10.4)             |
| Lake Soyang (2008.1 - 2009.12)  | 11.9 ± 6.2 (2 - 30)     | 2.2 ± 0.5 (1.2 - 3.7) | 4.8 ± 6.6 (0.5 - 44.6) | 1.7 ± 0.4 (1.2 - 3.0) | 0.02 ± 0.01 (0.003 - 0.006) | 76.4 ± 12.3 (59 - 128) | 2.3 ± 2.5 (0.1 - 17.6)             |

면역력 감소, 생식력 및 성장률 감소를 일으키는 환경요인으로 알려져 있다(Ardjosoediro and Ramnarine, 2002; Hoess and Geist, 2021; Sigler et al., 1984). 과거 소양호는 탁수의 발생이 심각한 문제를 초래하지 않았으나 1996년에 들면서 상류유역의 고랭지 경작이 성행하기 시작하면서 탁수의 지속기간과 농도가 증가하는 현상이 나타나기 시작하였고 이후 증가 추이를 보이고 있다(Kim and Jung, 2007).

비록 소양호 탁수 유입으로 인한 영향이 빙어의 성장을 저해하여 왜소화시키는 요인으로 작용하는지에 대한 직접적인 검토는 이루어지지 않았으나, 국내 대부분의 인공댐은 문순강우 시 중층으로 관입하는 탁수의 체류기간을 조절하는 수리수문학적인 특성과 문순강우 시 표층의 고수온을 피해 중층 탁수층과 거의 일치하는 수층으로 이동하여 제한적인 분포를 하는 냉수성 빙어의 생태학적인 특성이 중요한 왜소화의 원인으로 판단된다. 소양호 중층으로 유입하는 고탁수의 댐내 체류기간은 빙어의 먹이환경조건을 악화시키고 빙어의 왜소화를 초래하는 원인이라 판단된다(Kim et al., 2019; Lee et al., 2013).

### 성비 및 포란수

2019년 1월부터 4월까지 소양호 빙어의 암·수 성비를 비교하였다. 분석 결과 평균 1 : 1.93으로 수컷의 비율이 상대적으로 높았다. 하지만 3월 31일의 경우 1:0.92로 암컷의 비율이 더 높게 나타났다(Table 5). 3월 31일 채집된 암컷 빙어 중 생식소 성숙도가 15% 이상 되는 10개체를 대상으로 포란수를 확인하였다(Table 6). 암컷의 평균 전장은  $76.7 \pm$

**Table 5.** Sex ratio of *Hypomesus nipponensis* from January to April 2019 in Lake Soyang

|         | Female | male | Sex ratio |
|---------|--------|------|-----------|
| 18-Jan. | 7      | 13   | 1 : 1.86  |
| 31-Jan. | 9      | 11   | 1 : 1.22  |
| 13-Feb. | 4      | 16   | 1 : 4     |
| 20-Mar. | 5      | 15   | 1 : 3     |
| 31-Mar. | 12     | 11   | 1 : 0.92  |
| 04-Apr. | 7      | 13   | 1 : 1.86  |
| 13-Apr. | 7      | 23   | 1 : 3.29  |
| 23-Apr. | 8      | 12   | 1 : 1.5   |
|         | 51     | 102  | 1: 1.93   |

**Table 6.** Number of eggs in gonads of *Hypomesus nipponensis* in Lake Soyang on March 31, 2019

| No.     | Total length (mm) | Egg number           |
|---------|-------------------|----------------------|
| 1       | 64                | 1,983                |
| 2       | 75                | 4,897                |
| 3       | 83                | 3,852                |
| 4       | 86                | 6,898                |
| 5       | 90                | 7,608                |
| 6       | 75                | 2,359                |
| 7       | 78                | 5,894                |
| 8       | 71                | 5,978                |
| 9       | 79                | 8,327                |
| 10      | 77                | 6,783                |
| Average | $76.7 \pm 8.1$    | $5457.9 \pm 2152.95$ |

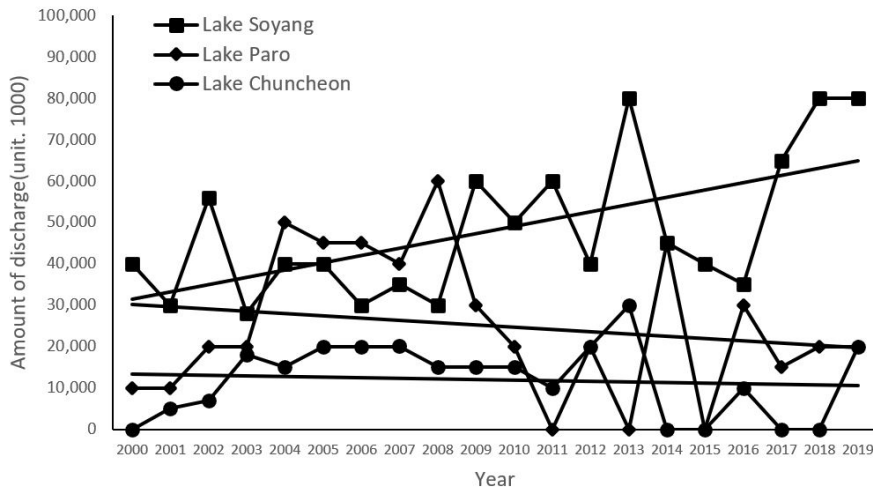


Fig. 8. Comparative analysis of the changes in *Hypomesus nipponensis* fertilized eggs released in Lake Soyang, Lake Paro, and Lake Chuncheon over the last 20 years (data source: Gangwon-do Naesu-myeon Resource Center).

8.1 mm이었으며 난수는  $5457.9 \pm 2152.95$ 개이었다. Byeon(2010)이 분석한 4,902개 보다 평균 500개 이상 많았다. 이는 빙어 개체군 사이에 먹이경쟁으로 인한 영향이 빙어의 성장에 부정적인 영향으로 작용할 수 있음을 시사한다.

### 수정란 방류

지속적인 빙어 수정란 방류 또한 소양호 빙어의 왜소화에 영향을 미친 것으로 예상된다(Fig. 8). 소양호의 경우 2000년대 이후 꾸준히 방류량이 증가하여 2019년에는 연간 8000만립에 달하는 수정란이 방류되었다(data source: Gangwon-do Naesu-myeon Resource Center). 이는 점차 방류량을 줄여가고 있는 춘천호, 파로호와 대비된다. 이러한 지속적인 수정란 방류는 소양호의 줄어든 1차 생산력과 맞물려 소양호 빙어 개체군 내 먹이경쟁을 심화시키고 나아가 현재의 빙어 왜소화에 영향을 주었을 것으로 판단된다(Shin, 2019).

### 결론

본 연구에서는 육봉화된 소양호 빙어 개체군은 석호에 서식하는 소하성 빙어에 비해 왜소화되어 있다는 가설을 입증하는 결과를 얻었고, 과거에 비해 빙어 개체군의 왜소화가 진행 중임을 파악하였다. 직접적인 원인에 관한 고찰의 결과 소양호의 유역환경과 수리수문학적인 특성 그리고 먹이환경에 기인한 결과가 복합적으로 작용한 결과로 판단되었다.

한편, 본 연구에서는 소양호내 서로 다른 조사 지점에서 채집한 빙어의 전장-무게를 계측한 결과, 소양호의 빙어는 지리적으로 성장단계에 따라 분포를 달리한다는 결과를 얻었다. 본 연구는 내수면 어족자원인 빙어의 생태학적인 특성에 대한 새로운 지견을 제공하였다.

본 연구 결과는 향후 효율적인 어족자원의 보전 및 관리를 위한 기초자료로써 활용할 수 있다. 특히, 수온변화에 민감한 냉수성 어종인 빙어는 강원도 지역의 중요한 내수면 어족자원이며 지역의 경제활성화를 위한 아이템이고, 기후환경변화에 따른 빙어 개체군의 생물량의 변화 및 분포 특성을 예측하고 대응하기 위한 환경 생물지표로써 활용가치가 크다.

## 사사

본 연구 논문은 인제군 농업기술센터의 도움을 받아 수행하였습니다. 이에 감사드립니다.

## 인용문헌(References)

- Appenzeller, A. R., Leggett, W. C. (1995) An evaluation of light-mediated vertical migration of fish based on hydroacoustic analysis of the diel vertical movements of rainbow smelt (*Osmerus mordax*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 52:504-511.
- Ardjosoediro, I., Ramnarine, I. (2002) The influence of turbidity on growth, feed conversion and survivorship of the Jamaica red tilapia strain. *Aquaculture* 212:159-165.
- Bandara, K., Varpe, Ø., Wijewardene, L., Tverberg, V., Eiane, K. (2021) Two hundred years of zooplankton vertical migration research. *Biological Reviews* 96:1547-1589.
- Byeon, H. K. (2010) Ecological characteristics of land-locked and anadromous population of hypomesus nipponensis (*Osmeridae*). *Korean Journal Of Ichthyology* 22:249-255. (in Korean with English abstract)
- Chang, K. H., Hanazato, T., Ueshima, G., Tahara, H. (2005) Feeding habit of pond smelt (*Hypomesus transpacificus nipponensis*) and its impact on the zooplankton community in Lake Suwa, Japan. *Journal of Freshwater Ecology* 20:129-138.
- Chapman, D. W. (1988) Critical review of variables used to define effects of fines in redds of large salmonids. *Transactions of the American Fisheries Society* 117:1-21.
- Choi, E. Y., Lee, O. K., Lee, T. W., Kim, C. H. (2000) A picture book of fishing for a Kangtaegong, Jisungsa. (in Korean with English abstract)
- Choi, K. C., Jeon, S. R., Kim, I. S., Son, Y. M. (1990) Coloured fishes of Korea. Hyangmunsa p.277. (in Korean with English abstract)
- Degraaf, D. A. (1986) Aspects of the life history of the pond smelt (*Hypomesus olidus*) in the Yukon and Northwest Territories 39:260-263.
- Han, K. H., Kim, Y. U., Myoung, J. G. (1996) Eggs development and larval development of the ice fish, hypomesus transpacificus nipponensis McAllister. (in Korean with English abstract)
- Hoess, R., Geist, J. (2021) Effect of fish pond drainage on turbidity, suspended solids, fine sediment deposition and nutrient concentration in receiving pearl mussel streams. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.116520
- Katayama, S., Omori, M., Radtke, R. L. (1998) Analyses of growth processes in the Lake Ogawara pond smelt population through the use of daily otolith increments. *Env Biol Fish* 52:313-319.
- Katayama, S., Saruwatari, T., Kimura, K., Yamaguchi, M., Sasaki, T., Torao, M., Fujioka, T., Okada, N. (2007) Variation in migration patterns of pond smelt, *Hypomesus nipponensis*, in Japan determined by otolith microchemical analysis. *Bull Jpn Soc Fish Oceanogr* 71:175-182.
- Kim, B. C., Jung, S. M. (2007) Turbid storm runoffs in Lake Soyang and their environmental effect. *Special Feature* 1185-1190. (in Korean with English abstract)
- Kim, I. S. (1997). *Encyclopedia of fauna & flora of Korea*, Vol. 37 animal (freshwater fish), Ministry of Education pp.133-520. (in Korean with English abstract)
- Kim, M. S., Kim, B. C., Jun, M. S. (2019) Seasonal succession of zooplankton community in a large reservoir of summer monsoon region (Lake Soyang). *Korean Journal of Ecology and Environment* 52:40-49. (in Korean with English abstract)
- Lee, J. Y., Choi, J., Owen, J. S., Lee, K., Heo, W., Kim, B. (2013) Habitat-specific variation in stable C and N isotope

- ratios of pond smelt (*Hypomesus nipponensis*). *Animal Cells and Systems* 17:213-219. (in Korean with English abstract)
- McAllister, D. E. (1963) A revision of the smelt family Osmeridae. *Nat Mus Canada Bull* 191:1-53. Power, Michael, and Martin J. Attrill. Temperature-dependent temporal variation in the size and growth of Thames estuary smelt *Osmerus eperlanus*. *Marine Ecology Progress Series* 330:213-222.
- Oh, H. J., Oda, Y., Ha, J. Y., Nagata, T., Hanazato, T., Miyabara, Y., Sakamoto, M., Chang, K. H. (2019) Responses of daphnids and other zooplankton populations to massive fish kill in Lake Suwa. *Ecological Research* 34:856-863.
- Shin, M. S. (2019) Long-term variation of primary productivity of phytoplankton in a deep reservoir (Lake Soyang). Dissertation for the Degree of Doctor 131.
- Sigler, J. W., Bjornn, T. C., Everest, F. H. (1984) Effects of chronic turbidity on density and growth of steelheads and coho salmon. *Trans Am Fish Soc* 113:142-150.
- Singh, A. A., Sunoh, N., Niwa, S., Tokoro, F., Sakamoto, D., Suzuki, N., Sakuramoto, K. (2015) Factors affecting Japanese pond smelt (*Hypomesus nipponensis*) stock trajectory in Lake Kasumigaura and Kitaura. *Open Journal of Marine Science* 5:210-225.
- Yoshioka, T., Wada, E., Hayashi, H. (1994). A stable isotope study on seasonal food web dynamics in a eutrophic lake. *Ecology* 75:835-846.