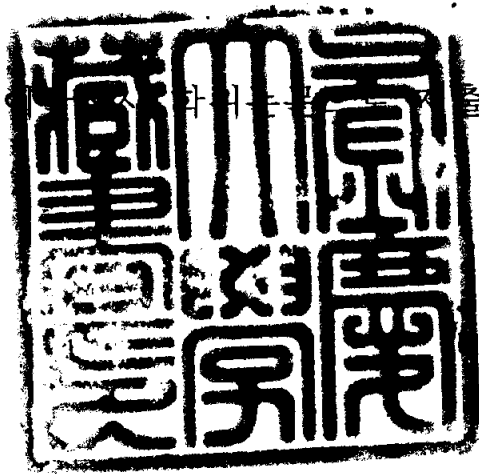


이학석사 학위논문

이석 내 미량원소를 이용한
연어(*Oncorhynchus keta*)의 계군분리

지도교수 김 수 암

이 논문을 이학석사 학위논문으로 제출함



2003년 8월

부경대학교 대학원

해양생물학과

손 동 화

손동화의 이학석사 학위논문을 인준함

2003年 6月 24日

주 심 이학박사 장 창 익



위 원 이학박사 최 만 식



위 원 이학박사 김 수 암



목 차

Abstract	1
서론	3
예비실험	11
1. 시료의 채집 및 분석	11
2. 결과	14
재료 및 방법	22
1. 연어치어의 생물학적 분석	22
2. 사육수의 금속농도 분석	23
3. 이석 내 금속농도 분석	23
4. 사육수와 이석 내 금속농도 비교, 분석	24
5. 연어치어의 계군분리	24
결과	25
1. 연어치어의 부화장별 상대성장 차이	25
2. 사육수의 금속농도	28
3. 이석 내 금속농도	32
4. 사육수와 이석 내 화학조성 관계	34
5. 연어치어의 계군분리	38
고찰	40

- 이석 내 화학조성과 물의 화학조성의 관계	42
- 계군분석	43
요약	46
감사의 글	48
참고문헌	50
Appendix	57

**Stock Identification of Chum Salmon (*Oncorhynchus keta*)
using Trace Elements in Otolith**

Dong-wha Sohn

*Department of Marine Biology, Graduate School,
Pukyong National University, Busan 608-737, Korea*

Abstract

The relationship between microchemistry of chum salmon otoliths and their ambient waters was investigated to develop the ways to distinguish chum salmon stocks in Korea. Ambient waters of reared fry were collected from three major hatcheries (Yangyang, Samchuk and Uljin) in the east coast of Korea in March 2002, October 2002 and March 2003, and the otoliths of hatchery-reared salmon fry were also collected in March 2002. Trace element in the otoliths and waters were analyzed using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) of the Korea Basic Science Institute.

Chemical composition of ambient waters and salmon fry did not significantly vary through the study period. Some trace elements/Ca such as Sr/Ca and Ba/Ca in the ambient waters seemed to be well reflected in the otoliths of salmon fry, though the absolute concentrations were different. These two elements might be indicators to distinguish hatcheries which have different chemical environments. Discriminant analysis with 8 element/Ca ratios (Na/Ca, Mg/Ca, Al/Ca, Cu/Ca, Sr/Ca, Ba/Ca, Mn/Ca, and Zn/Ca) represented a distinct separation in accordance with natality of stocks. The analysis of otolith chemistry would be a very effective technique for stock separation of fish populations. In the future, the origins of wild salmon caught in sea would be distinguished by the examination on the core portion of adult otoliths, which might have a similar pattern in microchemistry with salmon fry from the same origination.

서론

북태평양에는 모두 7종(chum salmon, sockeye salmon, pink salmon, chinook salmon, coho salmon, cherry salmon, amago salmon)의 연어과 어류들이 서식하고 있는데, 그 중에서 연어(*Oncorhynchus keta*; chum salmon)는 청어목(Clupeida) 연어과(Salmonidae) 연어속(*Oncorhynchus* sp.)에 속하는 냉수성 어종으로, 산란을 위하여 모천으로 회귀하는 모천회귀성 어종이다(Groot and Margolis, 1991). 연어는 환경적응력이 우수하여, 부화장에서 사육했던 치어를 거리가 멀리 떨어진 다른 하천에 방류한다고 하더라도 성어가 되어 산란회유를 할 때 방류된 하천으로 돌아온다고 알려져 있다. 아직 연어의 모천회유기작에 대해서 정확하게 밝혀지지 않는 않지만, 연어의 이러한 생물학적 회귀특성 때문에 각국에서는 연어의 증식 프로그램을 활발히 전개할 수 있었다. 우리나라 동해안에서 연어 증·양식 프로그램은 1913년 함경남도 고원에 연어 부화장을 세우면서 시작되었다. 그리고 해방 이후에는 1967년 삼척 오십천과 경남 밀양강에 부화장을 설립하고, 1984년 양양 남대천에 양양내수면 연구소를 설립하면서 연어증식프로그램이 본격적으로 확장되었다(성, 1999). 현재, 한국 동해안에는 강원도 양양의 남대천, 삼척의 마읍천, 경상북도 울진의 왕피천에 위치한 양양내수면연구소, 삼척내수면개발사업소, 경북민물고기연구센터에서 연어부화장을 유지하고 있다(Fig. 1). 각 지역 부화장에서 수정되어 부화한 연어치어는

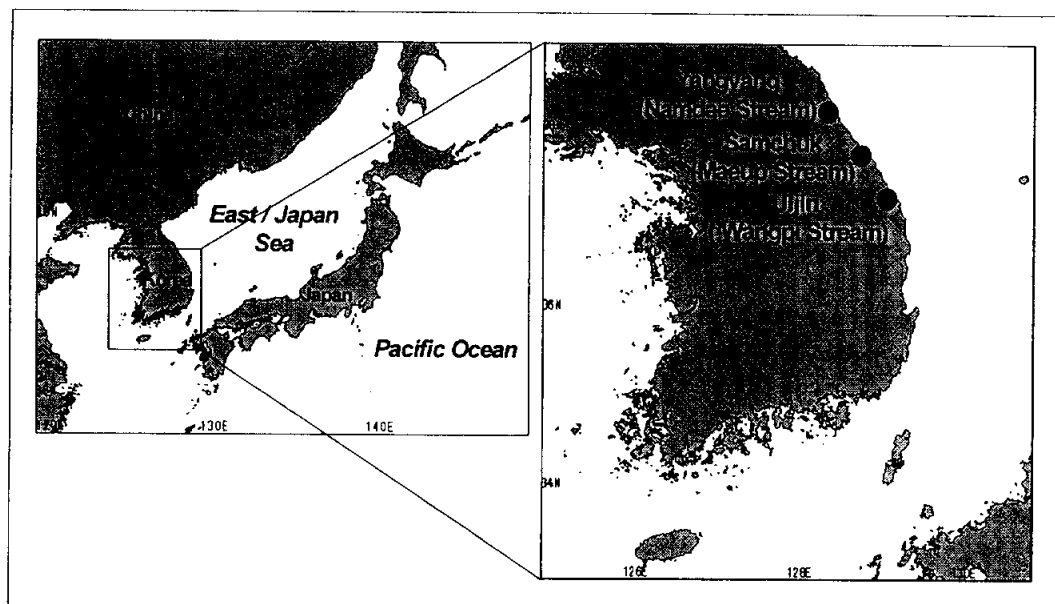


Fig. 1. Figure showing the locations of three major chum salmon hatcheries in Korea. Namdae, Maeup and Wangpi stream are located in Yangyang, Samchuk and Uljin, respectively.

겨울 동안에는 사육조에서 사육되고, 봄이 되면 동해안에 산재한 18개 하천에서 방류된다. 1985년에서 2002년까지 3개의 부화장에서 방류된 연어치어의 약 2억 2천만 마리였다. 봄에 방류된 대부분의 연어는 오토츠크해, 베링해 등의 북태평양 지역에서 약 3-5년을 지낸 후, 가을(9-11월)에 방류된 하천으로 산란을 하기위하여 모천회유를 하는 것으로 알려져 있다(KORDI, 2002; Fig. 2).

계군(stock)은 수산학에서 수산자원의 관리와 활용에 이용되는 기본 단위이다. 계군은 일정한 지리적인 분포구역 내에서 개체 상호간의 임의교배를 통해서 동일한 유전자 풀(gene pool)을 공유함으로써 일정한 유전자조성을 가지며, 동일한 생태학적 특성과 독자적인 수량 변동의 양상을 보이는 집단이라 할 수 있다(장, 1991). 해양어류의 경우, 같은 종(種, species)이라고 하더라도, 여러 계군으로 구분된다. 즉, 각 계군은 한정된 지리적 영역을 공유하며 서식하고 있으며, 동일한 산란장을 갖는 어족 집단으로서, 집단마다 고유한 생물학적 특성치를 가지고 있다. 어류의 계군을 규명하기 위한 연구 방법에는 재포획방법, 어획자료의 분석, 어류생활사의 차이 비교, 기생충(parasite)의 이용, 어류의 형태학적 비교, 유전학적 분석 그리고 이석(otolith) 내 화학조성 분석 등과 같이 전통적인 방법부터 현대적인 방법까지 다양하게 있다(Begg and Waldman, 1999). 현재 동해안에서는 연어의 인공부화 및 치어방류사업이 대대적으로 실시되고 있다. 이를 보다 효율적이며 체계적으로 관리하기 위해서는 계군의 구조를 규명하고 이해하는 것이 중요하다. 그리고 연어와 같이 여러 국가의 해역을 통과하는 모천회귀성 어종일

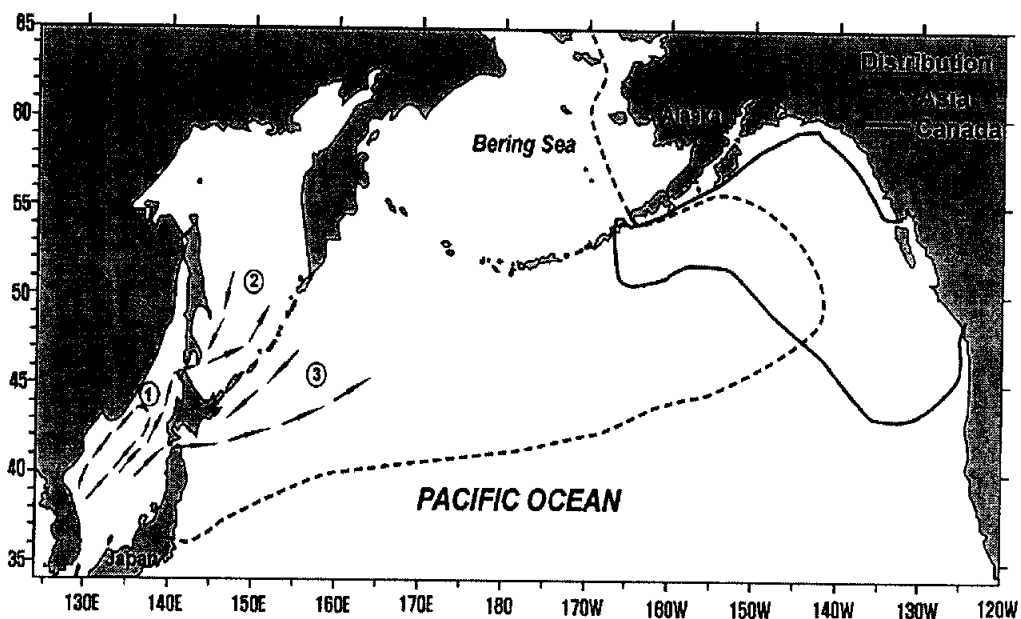


Fig. 2. Migration pathways of released chum salmon from Korea.

① East Sea, ② Sea of Okhotsk, ③ North Pacific Ocean

Dotted line indicates the distributional boundary of Asian chum salmon released from Korea, Japan, and Russia (KORDI, 2002).

경우에는 어업분쟁이 발생할 가능성이 크며, 분쟁을 경감하기 위해서 계군분리 연구의 필요성이 제기되고 있다.

최근, 분석기기의 분석능력과 측정치의 정밀도가 향상함에 따라 어류의 이석 내 화학조성을 이용한 연구활동은 가속화되고 있다. 1980년 이전에는 이석 내 화학조성을 이용하여 연구된 논문이 단지 6편에 불과하던 것이 1998년 말까지 157편의 논문이 보고되었다(Campana, 1999). 현재는 이보다 더 많은 연구 결과들이 보고되고 있다. 어류의 내이에는 sagitta, lapillus, asteriscus라고 불리는 3쌍의 이석이 존재하는데, 그 중에서 크기가 제일 큰 sagitta를 연구에 주로 이용하고 있다. 이석의 구성물질은 96%의 탄산칼슘과 3%의 유기물 복합체 그리고 약 1%을 차지하는 31가지의 원소(Campana, 1999)와 약간의 방사선 동위원소로 이루어져 있다. 이석은 어류의 전 생활사에 걸쳐서 성장하며, 이렇게 형성된 어류의 이석 내 화학조성은 형성 후엔 변화하지 않는다는 특징을 가지고 있는데(Campana and Neilson, 1985), 위와 같은 사실을 바탕으로 이석 내 미량원소 분석 또는 동위원소 분석을 이용한 연구가 활발히 진행되고 있는 것이다. 많은 연구자들은 이석 내 화학조성이 어류 개체가 서식하는 환경의 화학원소 농도에 영향을 받으므로, 어류 이석을 구성하고 있는 화학원소들은 서로 다른 서식지를 가지는 어류의 계군구조와 회유경로를 상세히 묘사하고, 지시할 수 있는 자연적 표지(natural tag) 또는 지문(fingerprint)이라고 보았다(Campana *et al.*, 1995; 1999; Campana and Thorrold, 2001; Gillanders and Kingsford, 2000; Rooker, 2002; Thresher, 1999; Thorrold *et al.*, 1997, 1998). 즉,

각 어류 이석의 미량원소 함량이 다르다는 것은 각 어류 개체의 서식 환경이 달랐음을 의미하며, 한 개체의 이석에서도 부분별로 화학조성이 다르게 나타난다는 것은 어류의 생활사에 따른 서식환경의 차이가 있음을 의미한다. 이러한 이석의 특징으로 인하여 서식지나 산란장이 다른 계군이나 군집을 분리할 수 있는 수단으로 이용할 수 있다. 또한, 어류 이석 내 미량원소와 동위원소의 농도를 분석하여 어류 서식지의 오염정도를 파악할 수 있으며(Hanson and Zdanowicz, 1999), 어류의 회유경로(Halden *et al.*, 2000; Secor, 1992; Thresher *et al.*, 1994), 연령사정(Tzeng, 1999) 등의 연구에도 이용하고 있다.

위와 같은 연구가 활발하게 진행됨에 따라 어류 이석을 구성하는 원소의 비율에 영향을 미치는 요인이 무엇인지 추구하는 연구들이 시작되었다. 모든 원소에 해당하는 것은 아니지만, 어류 이석 내 미량원소에 영향을 미치는 요인에 대하여 몇몇 연구자들은 어류가 서식하는 환경수의 화학조성이 어류 이석을 구성하는 몇몇 원소에 영향을 미치는 주요한 요인이라 하였다(Hoff and Fuiman, 1995; Milton and Chenery, 2001; Bath *et al.*, 2000). Rieman *et al.*(1994)은 이석의 화학조성 중 Sr/Ca에 영향을 미치는 물의 화학조성의 중요성을 강조하였으며, Farrell and Campana(1996)는 어류의 이석을 구성하는 미량원소 Sr은 어류의 먹이보다는 서식했던 물의 미량원소 농도에 더 큰 영향을 받는다고 주장하였다. 또한, Campana(1999)는 물에 녹아있는 Sr, Zn, Mn, Ba와 같은 특별한 금속원소들만 이석에 잘 반영된다고 보고하였다. 반면, 다른 연구자들은 이석 내 미세화학물질의 구성은 어류가 서식하고

있는 물의 화학조성만을 단순히 반영하는 것이 아니라(Rooker *et al.*, 2001), 다양한 환경적·생리학적 과정을 통하여 Sr의 농도가 이석에 가장 잘 반영된다는 것을 발표하였다(Brown and Harris, 1995; Schroder *et al.*, 1995). 즉, 어류의 생리학적 과정이나 수온(Townsend *et al.*, 1995), 먹이(Gallahar and Kingsford, 1996; Limburg, 1995) 그리고 스트레스(Kalish, 1989), 염분, pH, 용존산소 농도 등이 영향을 미치고 있다고 주장하였다. 어류의 이석을 구성하는 원소 농도에 영향을 미치는 요인에 관하여 많은 연구들이 진행되고 있으며, 여러 가지 요인 중에서 중추적인 역할을 하는 것이 무엇인가에 대한 논의는 계속되고 있다.

위의 연구결과들을 기초로 하여, 본 연구에서는 크게 4 단계로 연구를 수행하였다.

1 단계

예비실험으로 산란장을 달리하는 연어치어와 각 하천에 서식하는 여러 어류의 이석을 채집하여 각 지역(양양, 삼척, 울진)마다 이석 내 화학조성이 차이가 있는지를 조사하였으며, 연어치어의 사육수의 화학조성을 분석하여 연어치어 이석 내 화학조성과 비교분석하여 어떠한 상관관계를 가지는지 알아보았다. 예비실험의 결과를 토대로 하여 동해안에서 방류되고, 상업적으로 중요한 어종인 연어를 본 연구의 실험대상종으로 선택하였다.

2 단계

우리나라의 3곳의 연어부화장 각각의 연어 사육수의 화학조성이 지역별로 차이가 있는지를 밝히고, 또한, 연어 이석을 구성하고 있는 화

화학조성이 각 지역별로 차이가 있는지를 알아보았다.

3 단계

각 부화장의 사육수와 연어 이석 내 화학조성을 비교, 분석하여 사육수와 이석 내 화학조성간의 관련성을 살펴보고 이석의 화학조성에 영향을 미치는 요인을 밝히고자 하였다. 만약, 각 연어부화장에서의 연어사육수와 이석 내 화학조성이 비슷한 경향으로 나타나고, 3곳의 연어부화장마다 특징적인 화학조성을 가지고 있다면 연어의 산란장에 따라 3개의 계군으로 분리할 수 있을 것이다.

4 단계

사육수와 연어 이석 내 화학조성의 지역별 차이와 시간별 차이를 조사하였다. 즉, 화학조성의 지리적 차이가 어느 한 지역에서의 년변동의 폭보다 더 큰 값을 가지는지 알아보기 위하여 2001년과 2002년의 사육수와 이석 내 화학조성을 비교, 분석하였다. 공간적 차이가 시간적 차이보다 크고, 한 지역이 일정한 농도를 보인다면 연어 계군을 분리하는 기초자료로 사용할 수 있을 것이다.

본 연구의 최종적인 목적은 외양에서 야생의 상태로 포획된 연어 성어의 계군을 분리할 수 있는 새로운 방법을 제시하는 것이다. 이를 위해 첫 단계로 한국 동해에 위치하는 연어부화장 3 곳으로부터 수집된 연어사육수와 연어 이석의 화학조성을 비교·분석하여 태어난 지역을 구분해 보고자 한다.

예비실험

우리나라 동해안에서 다른 3지역에서 산란하는 연어치어와 각 하천에 서식하는 어류들의 이석을 채집하여 각 지역(양양, 삼척, 울진)마다 이석을 구성하고 있는 금속농도의 지역적 차이를 살펴보고, 지역별 사육수의 금속농도의 지역별 차이를 알기 위하여 2001년 봄에 예비실험을 수행하였다.

1. 시료의 채집 및 분석

2001년 3월에 양양, 삼척, 울진의 부화장에서 각각 5, 9, 13마리의 연어치어를 채집하였다. 채집된 연어치어는 가랑이체장(fork length)과 체중(body weight)을 측정한 뒤, 이석을 추출하여 증류수로 깨끗이 행구어서 말린 후 이석의 무게를 측정하였다. 그리고 2001년 6월에 각 지역 하천인 양양 남대천, 울진 왕피천과 삼척부화장에서 서식했던 어종을 채집하였다. 양양 남대천에서는 은어(sweet smelt), 황어(sea rundance), 숭어(mullet)를 채집하였으며, 삼척지역에서는 부화장에서 산천어(rainbow trout), 숭어(trout)를 그리고 부근 낚시점에서 판매하는 은어를 채집하였다. 울진 왕피천에서는 황어, 돌고기(striped shinner), 동사리(Korean dark sleeper), 피라미(pale chub), 모래무지(goby minnow), 은어를 채집하였다(Table 1). 이렇게 채집된 어종들도

Table 1. Fish collected from three areas in the east coast of Korean Peninsula during spring 2001.

study area	species	number	length(cm)
Yangyang area			
hatchery	chum salmon fry	5	6.1 ± 0.4
Namdae stream	sweet smelt	1	12.1
	sea rundace	1	8.8
	mullet	1	21.3
Samchuk area			
hatchery	chum salmon fry	9	5.7 ± 0.3
nearby fishing store	sweet smelt	3	28.1 ± 0.2
Maeup stream	rainbow trout	1	25.7
	trout	2	22 ± 0.6
Uljin area			
hatchery	chum salmon fry	12	8.2 ± 0.8
Wangpi stream	sea rundace	1	34.1
	striped shinner	2	13.6 ± 0.9
	Korean dark sleeper	2	12.6 ± 1.5
	pale chub	2	12.4 ± 1.2
	goby minnow	2	9.6 ± 0.4
	sweet smelt	1	10.2 ± 0.1

연어치어와 마찬가지로 가랑이채장과 체중을 측정하였으며, 이석을 추출하여 증류수로 깨끗이 씻어 말린 후에 이석의 무게를 측정하였다. 유도결합 플라즈마 질량분석기(ICP-MS, 한국기초과학지원연구원)를 이용하여 미량원소를 분석하기 위해서는 분석시료의 양이 최소 0.01g 이상이 되어야 하기 때문에 어류의 종별로 이석을 여러개 모아서 0.01g 정도의 시료를 만든 후에 기기분석을 실시하였다. 분석된 원소의 농도 단위는 ppm과 ppb에서 각 원소의 원자량으로 나누어 몰농도로 변환하여 표시하였으며, 표준화하기 위하여 원소와 Ca의 농도비율로 표현하였다. 연어치어 이석에서 분석된 원소 중 Si, K, Fe, U 값은 일정한 값을 보여주지 않았기 때문에 8원소(Na, Mg, Al, Cu, Sr, Ba, Mn, Zn)의 농도를 이용하여 화학조성의 지역별 차이를 비교하였다. 그리고 여러 어종의 이석 내 원소는 7원소(Na, Mg, Cu, Sr, Ba, Mn, Zn)를 이용하여 지역별로 비교하였다.

사육수의 화학조성을 지역적으로 비교하기 위하여 분석된 원소 농도와 Ca 농도비율을 사용하였다. 이들 농도비율들은 계절적으로 크게 변화하지 않는다고 가정한 후, 지역마다 특성이 있는지 그리고 연어이석과 어떠한 상관관계를 가지는지를 관찰하기 위하여 2001년 6월에 양양, 삼척, 울진부화장의 사육수를 채집하였다. 각 부화장의 사육수는 100ml씩 채수하였으며, 현장에서 수동진공펌프와 공극크기 0.45 μ m인 셀룰로즈 멤브레인 여과지를 이용하여 부유물질을 제거한 후, 미리 5% HCL 용액으로 세척한 플라스틱병에 담고 질산 0.5ml 로 시금 용액을 산성화한 다음 실험실로 옮겼다. 통계적 신뢰성을 높이기 위해 한 산란장마

다 3개의 사육수 시료를 만들었다. 채집된 사육수는 한국기초과학지원 연구원의 ICP-MS(model: PQ3STE, FISIONS)를 이용하여 주요원소와 미량원소를 분석하였다. 분석된 원소의 농도단위는 몰농도로 변환하여 표시하였다. 또한, 이석 내 원소함량 비율과의 비교를 용이하게 하기 위하여 8원소(Na, Mg, Al, Cu, Sr, Ba, Mn, Zn)를 중심으로 자료를 분석하였다. 사육수의 표본의 개수가 적었지만 각 부화장별로 사육수를 구성하는 원소농도에서 차이가 있는지를 알아보기 위하여 지역별로 원소/Ca 농도비율을 구하였다.

2. 결과

연어치어와 각 지역별 하천 및 부화장에서 채집된 어종들의 이석에서 13종의 원소(Ca, Na, Mg, Si, K, Al, Mn, Fe, Cu, Zn, Sr, Ba, U)가 각각 분석 되었다(Appendix I). 먼저, 3 지역의 연어치어 이석의 금속 농도를 살펴보면, Sr/Ca, Ba/Ca, Al/Ca, Cu/Ca의 농도비율이 양양 부화장 연어에서 가장 높게 나타났으며, Na/Ca, Mn/Ca, Zn/Ca의 비율은 울진 부화장 연어에서 가장 높은 값을 보였다. 한편, Mg/Ca값을 제외한 대부분의 원소는 삼척 부화장 연어에서 가장 낮은 값이 나타났다. 또한, Mg/Ca비율의 경우, 삼척 부화장 연어에서 가장 높았으며, 울진 부화장 연어에서 가장 낮게 나타났다(Table 2). 즉, 금속농도의 비율값을 살펴보았을 때, 시료가 제한되어 통계적 검정을 할 수는 없었지만 각 지역의 연어이석의 화학조성은 지역마다 차이가 있다는 것을 발견

Table 2. Molar ratios between elements and Ca in otoliths of salmon fry collected at March 2001.

Study area	Na/Ca mmol/mol	Mg/Ca mmol/mol	Al/Ca μ mol/mol	Mn/Ca μ mol/mol	Cu/Ca μ mol/mol	Zn/Ca μ mol/mol	Sr/Ca μ mol/mol	Ba/Ca μ mol/mol
Yangyang	13.87	2.79	385.77	7.74	7.45	247.07	1535.86	9.64
Samchuk	13.02	2.81	24.60	1.82	2.76	82.38	172.97	0.73
Uljin	14.55	1.29	124.24	8.62	5.92	256.36	830.30	3.63

하였다.

각각의 동일한 환경수를 가지는 양양 남대천과 울진 왕피천에 서식했던 은어, 황어, 송어와 돌고기, 동사리, 모래무지, 피라미, 은어, 황어의 이석 내 화학조성을 위에 사용한 원소농도비율을 이용하여 살펴보았다(Table 3). 각 지역내에서 어류종에 따라 화학조성이 차이가 없거나(Mg) 크게는 27배까지(Mn) 달리 나타났다. 즉, 각 어종마다 생리적 대사작용이나 먹이의 차이에 의해 주변환경수가 동일하다고 하더라도 이석 내 화학조성은 어류종에 따라 달라진다고 판단된다.

또한, 양양 남대천과 울진 왕피천 양쪽에 다 서식하는 은어와 황어의 이석 내 금속농도를 비교해보면, 같은 종류의 어종들이라도 지역별로 이석의 화학조성이 다르게 나타났다. 즉, 양양 남대천에 서식했던 은어 이석의 경우는 Mn/Ca(18.2), Sr/Ca(2392.6), Ba/Ca(6.6), Cu/Ca(27.2)이었고, 울진 왕피천 은어 이석의 금속농도는 Mn/Ca(2.4), Sr/Ca(932.6), Ba/Ca(1.9), Cu/Ca(1.4)였다. 그리고 양양 남대천 황어 이석의 금속농도는 Na/Ca(7.6), Mg/Ca(0.5), Sr/Ca(1481.1), Ba/Ca(6.2), Zn/Ca(58.0)로 나타났고, 울진 왕피천 황어의 이석에서는 Na/Ca(2.9), Mg/Ca(1.2), Sr/Ca(386.3), Ba/Ca(0.2), Zn/Ca(25.5)이었다. 동일한 어종인데도 불구하고 서식하는 지역에 따라 이석 내 화학조성이 다르게 나타나는 것은 이석의 화학조성이 서식지 환경을 반영하기 때문인 것으로 생각된다.

특이한 것은 삼척부화장에서 채집된 산천어와 송어의 이석 내 화학조성은 유사한 양상을 보였다. 이러한 화학조성 결과는 계통적으로 가까운 종이 같은 사육수와 먹이를 이용하여 배양되었기 때문인 것으로

Table 3. Concentrations of 7 elements/Ca in otolith of various fish species collected from the east coast of Korea in June 2001.

Study area	species of otolith	Na/Ca mmol/mol	Mg/Ca mmol/mol	Mn/Ca μmol/mol	Sr/Ca μmol/mol	Ba/Ca μmol/mol	Cu/Ca μmol/mol	Zn/Ca μmol/mol
Yangyang	sweet smelt	12.9	0.1	18.2	2392.6	6.6	27.2	85.1
Yangyang	sea rundace	7.6	0.5	4.9	1481.1	6.2	1.4	58.0
Yangyang	mullet	12.3	0.1	9.4	3283.0	45.9	4.5	14.0
Samchuk	trout	14.2	0.1	3.8	308.4	0.8	0.9	59.6
Samchuk	rainbow trout	13.7	0.1	3.5	324.1	0.8	2.7	68.3
Samchuk	sweet smelt	13.6	0.1	65.0	6197.5	26.4	5.4	308.3
Uljin	sea rundace	2.9	1.2	4.1	386.3	0.2	1.9	25.5
Uljin	striped shinner	4.7	0.8	26.1	411.7	6.3	1.8	77.1
Uljin	Korean dark sleeper	13.2	0.1	8.5	1018.1	12.0	0.7	3.5
Uljin	Korean dark sleeper	14.5	0.1	16.1	1010.3	8.3	0.7	8.8
Uljin	pale chub	3.7	0.8	17.0	86.1	0.4	1.7	54.1
Uljin	sweet smelt	13.6	0.1	2.4	932.6	1.9	1.4	88.5
Uljin	goby minnow	12.3	0.0	1.9	772.4	8.6	1.6	7.0
Uljin	goby minnow	11.2	0.0	2.1	841.7	8.8	0.9	7.0

생각된다. 삼척 낚시점에서 채집된 은어의 이석을 구성하는 화학조성은 다른 두 지역과 굉장히 큰 차이를 보여주는데 이 차이는 낚시점 수족관의 물의 화학조성에 영향을 많이 받았다고 생각된다. 수족관 물은 먹이도 풍부하고, 부유물질과 영양염이 많아서 다른 지역 은어종의 이석내 화학조성과 아주 큰 차이를 보인 것 같다. 그리고 다른 어류종에 비해서 은어의 Sr/Ca의 농도가 월등히 높은 이유는 은어의 생활사에서 기인된다. 은어의 생활사를 살펴보면, 기수역에서 산란하고 담수에서 성장하는데 보통 Sr/Ca의 농도는 담수보다 해수에서 높은 값을 가진다고 알려져 있다(Tzeng and Tsai, 1994). 본 분석에서 이용된 은어는 모두 강어귀에서 채집되었다.

2001년 6월 하천수에서 15원소(Ca, K, Na, Mg, Si, Al, Mn, Fe, Cu, Co, Ni, Zn, Sr, Ba, U)가 분석되었다(Appendix II). 지역별 차이를 나타내기 때문에 원소/Ca를 사용하지 않고 몰농도로 비교하였다. 양양부화장과 삼척부화장에서 채수된 사육수의 화학조성은 대부분 높은 농도를 보이는 반면, 삼척부화장 사육수의 금속농도는 낮은 값을 보였다. 하지만, Mg의 경우 세 지역에서 0.08~0.09로 유사하게 나타났으며, Mn은 울진부화장에서 0.18로 제일 높은 값을 보였으며, 양양부화장과 삼척부화장에서 0.08로 유사한 값을 나타냈다. 또한, 이석의 화학조성과 비교하기 위하여 선택된 8원소/Ca 비율의 경우에도 사육수의 대부분은 지역별로 차이가 나는 것을 알 수 있었다(Table 4).

각 지역별 부화장의 연어치어 이석과 사육수의 금속농도를 비교하여 보았을 때, 이석과 사육수의 지역별 농도변화가 동일하거나 혹은 유사

Table 4. Concentrations of 8 element/Ca in reared water of salmon fry collected from the east coast of Korea in June 2001.

01' June reared water	Na/Ca mmol/mol	Mg/Ca mmol/mol	Al/Ca μmol/mol	Mn/Ca μmol/mol	Cu/Ca μmol/mol	Zn/Ca μmol/mol	Sr/Ca μmol/mol	Ba/Ca μmol/mol
Yangyang	2784.1	415.4	3164.7	394.1	574.2	1212.3	4821.4	575.2
Yangyang	2741.1	414.0	2573.7	376.6	267.5	2312.6	5120.5	554.6
Yangyang	2713.9	417.8	3613.1	378.8	306.4	2421.7	5114.1	561.9
Samchuk	169.6	103.3	627.0	91.7	65.2	563.4	1247.5	135.1
Samchuk	163.7	102.5	848.0	88.9	71.9	568.3	1200.3	131.9
Uljin	1124.1	350.2	847.5	745.6	222.1	2541.2	1911.9	143.0
Uljin	770.5	295.7	378.6	570.1	172.4	722.3	1844.5	102.4

한 원소들이 있었다. 특히, Mn, Cu, Zn, Ba, Sr의 이석 내 농도와 사육수의 농도를 순서별로 배열하였을 때, 이석을 구성하는 Sr/Ca, Mn/Ca, Cu/Ca의 농도비율의 변화 모양은 이석과 사육수에서 같은 경향을 보이고 있다(Fig. 3). 그리고, Zn/Ca, Ba/Ca의 비율도 대체로 환경수와 이석에서 유사한 경향으로 나타나고 있음을 알 수 있다(Table 2, Table 4).

예비실험을 통하여, 동일한 서식지역을 가진다고 해도 어류종에 따라 이석 내 금속농도는 차이가 있음을 알 수 있었으며, 동일종에서도 서식지가 다르면 이석 내 화학조성이 달라진다는 것을 알 수 있었다. 또한, 연어치어 이석과 사육수의 지역별 화학조성을 비교하였을 때, Sr, Mn, Cu 같은 원소들은 사육수와 어류 이석 내 원소농도가 상관관계를 가지는 것을 알 수 있었다. 즉, 이석 내 화학조성이 주변 환경수의 영향을 반영할 가능성이 있음을 알 수 있었다. 따라서 이러한 원소들에 의해 지역별로 연어의 산란장과 서식지를 분리할 수 있다고 생각된다. 본 연구에서는 예비실험 결과를 토대로 하여 어류 이석 내 화학조성에 영향을 미치는 요인을 밝히고, 지역별로 차이가 나는 어류 이석의 화학조성을 이용하여 어류 계군의 분리를 실시하고자 하였다. 각 지역별로 좀 더 쉽게 채집할 수 있고, 회유성 특징으로 국가간의 어업분쟁이 발생할 가능성이 큰 연어를 실험대상종으로 선택하였다.

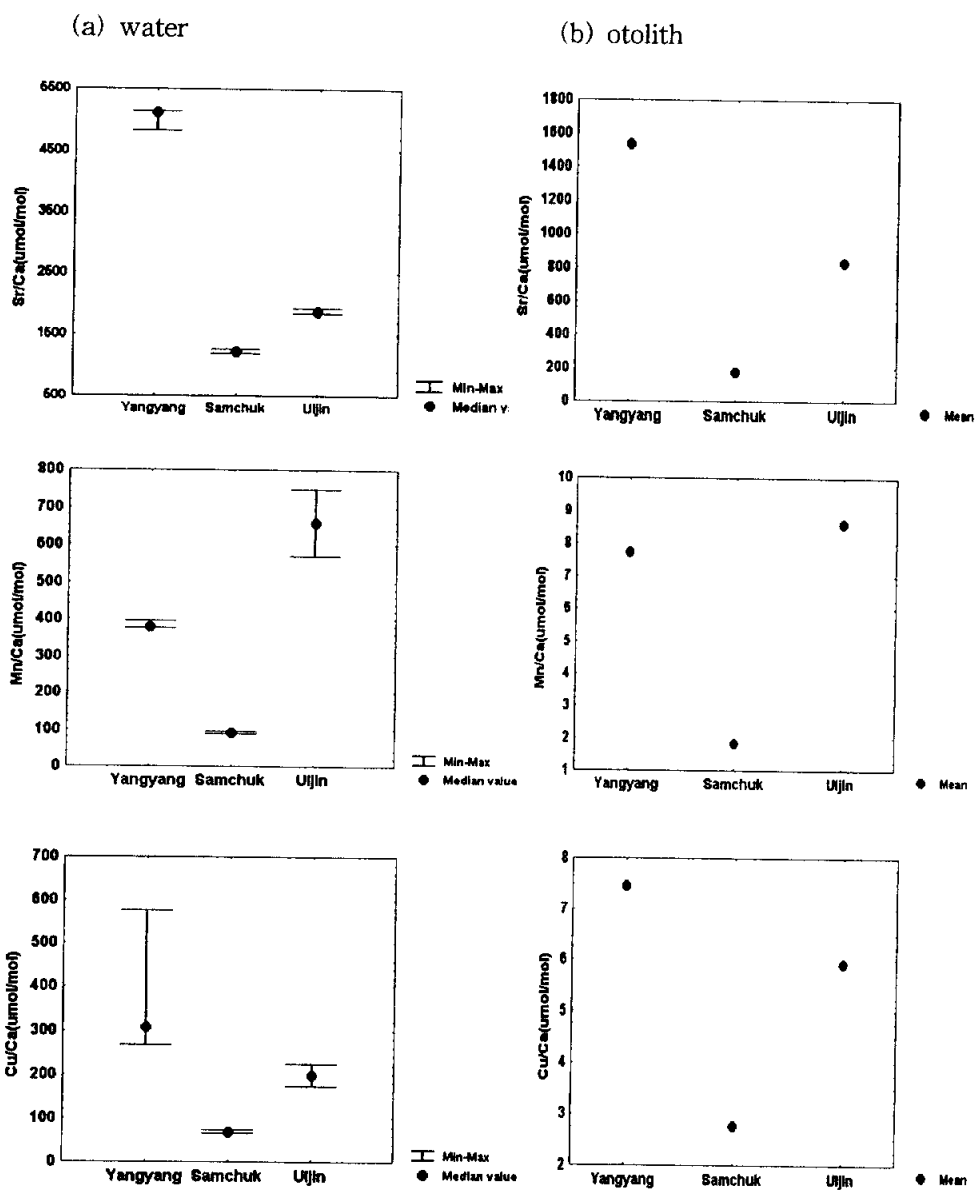


Fig. 3. Comparison of Sr/Ca, Ba/Ca and Mn/Ca ratios in ambient reared water collected in June 2001 and otolith of salmon fry collected from the east coast of Korea in March 2001.

재료 및 방법

1. 연어치어의 생물학적 분석

연어치어는 3곳(양양내수면연구소, 삼척내수면개발사업소, 경북민물고기연구센터)의 연어부화장에서 2002년 3월에 각각 280, 266, 303마리를 채집하였다. 채집된 연어치어는 냉동상태로 만들어 실험실로 옮겼으며, 실험실에서 가랑이체장(cm)과 체중(gram)을 측정하였다. 2002년 3월에 채집된 연어치어는 각 지역 부화장의 채란일이 10월 10일로 동일하여 지역 부화장별로 연어치어의 상대성장 비교가 가능하였다. 치어의 성장 상태를 파악하기 위하여 2002년 3월에 채집된 각 지역별 부화장에서 방류되는 연어치어의 가랑이체장과 체중간의 상대성장식 $W=aL^b$ 를 이용하여 비선형회귀방법으로 추정하였다. 치어의 상대성장이 부화장별로 차이가 있는지 알아보기 위하여 공분산 분석(ANCOVA)을 실시하였다.

2. 사육수의 금속농도 분석

각 부화장에서는 하천수(양양 남대천) 혹은 지하수(삼척 초당굴, 울진)를 끌어 올려 부화한 연어치어를 사육하고 있으며, 부화한 치어는 약 3개월 정도 양육되다가 2-3월에 하천으로 방류된다. 사육수는 3곳의 연어부화장에서 2002년 3월과 10월 그리고 2003년 3월에 각각 채수하였다. (채수의 방법과 분석결과의 표현은 ‘예비실험 1. 시료의 채집 및 분석’에서 이용된 방법과 동일함.)

3. 이석 내 금속농도 분석

2002년 3월에 채집된 연어치어는 체장과 체중을 측정한 후, 이석을 추출하였다. 추출된 이석은 초음파 세척기에 10분 동안 담근 후 증류수로 행구어 자연건조시킨 후 무게를 측정하였다. 이석은 미량원소 분석을 위해서 최소분석무게인 0.01 gr(대략 20-40마리의 연어치어 이석)을 한 묶음으로 하여 분석하였다. 연어치어 이석 내 화학조성도 ‘예비실험 1. 시료의 채집 및 분석’에서 설명된 방법으로 분석되었다. 2002년에 채집된 연어치어 이석 내 화학조성이 각 부화장별로 차이가 있는지를 알아보기 위하여 분산분석(ANOVA)을 실시하였다.

4. 사육수와 이석 내 금속농도 비교, 분석

지역별로 차이가 나는 이석을 구성하는 금속원소들의 농도에 영향을 미치는 요인을 밝히고자 각 부화장의 사육수와 연어치어 이석 내 화학조성의 관계를 비교·분석하였다. 예비실험에서 채집된 연어치어 이석과 사육수의 원소/Ca의 비율(2001년 3월과 6월)과 2002년 3월에 채집된 연어치어 이석과 사육수의 화학조성 결과에서 사육수의 원소/Ca의 비율에서 그곳에 서식하던 연어치어의 이석을 구성하는 화학조성에 영향을 미치는지를 알아보았다. 각각의 연구지역에서 사육수와 이석의 원소/Ca 비율의 평균값의 양상을 비교하였으며, 사육수와 이석 내 화학조성에서 상관관계를 가지는 원소들 분석하였다. 또한, 이 두 요소에 대한 회귀분석을 하였다.

5. 연어치어의 계군분리

연어부화장에서의 연어사육수와 이석 내 화학조성이 비슷한 경향으로 나타나고, 3곳의 연어부화장마다 특징적인 화학조성을 가지고 있다면 연어의 산란장에 따라 3개의 계군으로 분리할 수 있을 것이다. 연어의 계군을 분리하기 위하여 3 지역의 연어치어 이석 내 8원소/Ca 비율을 이용하였으며, 다변량분석 방법 중 하나인 판별분석(Discriminant analysis)을 수행하였다. 본 연구에서 모든 통계분석은 99' STATIS-TICA 프로그램으로 실시되었다.

결 과

1. 연어치어의 부화장별 상대성장 차이

채집 지역별로 성장의 차이를 살펴보기 위하여 채집된 연어의 체장(W), 체중(L)을 살펴보았다. 연어치어의 가량이 체장의 평균과 편차는 양양, 삼척, 울진 부화장별로 4.2 ± 0.3 , 5.5 ± 0.3 , 7.6 ± 0.7 cm으로 나타났다으며, 체중의 평균과 편차는 0.9 ± 0.2 , 2.1 ± 0.3 , 5.3 ± 1.3 gr으로 측정되었다. 연어치어 이석의 장경의 평균과 편차는 양양, 삼척, 울진 부화장별로 8.5 ± 0.4 , 9.9 ± 0.7 , 13.1 ± 1.1 μ m로 나타났다. 방류시기가 비슷한 3곳 부화장의 연어치어 성장에서 차이가 보였다. 모두 동일한 나이임에도 불구하고, 왕피천에 서식하던 연어 치어가 제일 크고 무거웠으며, 남대천에 서식했던 연어 치어의 크기가 제일 작았다. 양양부화장, 삼척부화장, 울진부화장의 연어치어에 관한 상대성장식은 각각 $W=0.026L^{2.60}$, $W=0.024L^{2.63}$, $W=0.009L^{3.20}$ 로 나타났다(Fig. 4). 치어의 상대성장에서 방류되는 하천간에 차이가 있는지 공분산 분석을 실시한 결과는 지역별로 연어치어의 성장에 있어서 유의한 차이를 보였다 ($F=28.9$, $p<0.001$; Table 5).

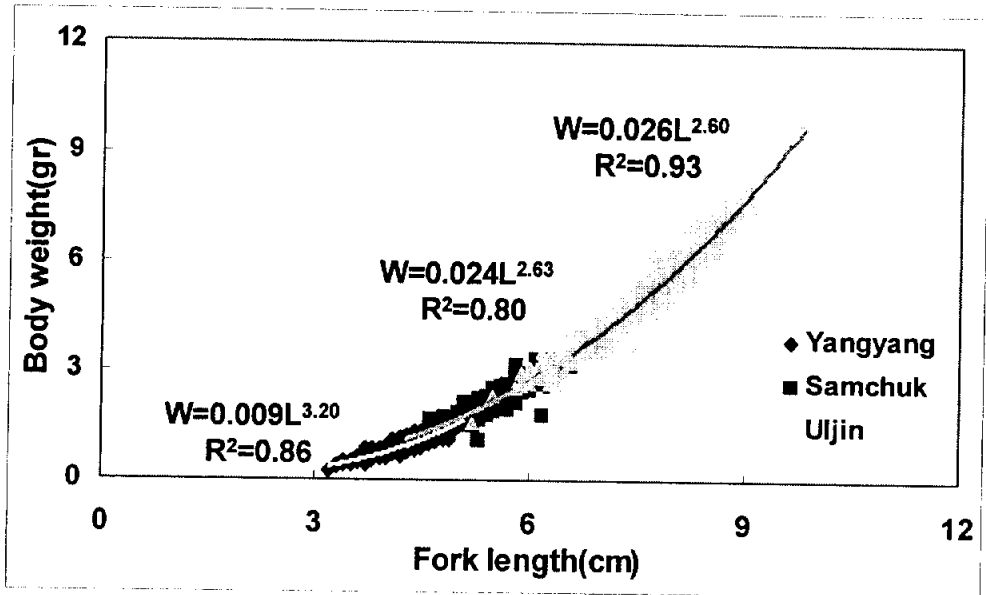


Fig. 4. Relationship between fork length and body weight of chum salmon fry collected from three study areas in March 2002.

Table 5. ANCOVA of relationship between fork length and body weight of salmon fry in three study area.

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Fork length	1	484.369	49.346	49.346	5003.55	0.000
Study area	2	1.838	0.685	0.342	34.71	0.000
Fork length*area	2	0.570	0.570	0.285	28.90	0.000
Error	843	8.314	8.314	0.010		
Total	848	495.091				

2. 사육수의 금속농도

2002년 3월 사육수는 12원소(Ca, Na, Mg, Si, Al, Mn, Fe, Cu, Zn, Sr, Ba, U)가 분석되었고(Appendix III), 2002년 10월 사육수와 2003년 3월 사육수는 14원소(Ca, Na, Mg, Si, Al, Mn, Fe, Cu, Zn, Sr, Ba, U, Li, K)가 분석되었다(Appendix IV와 Appendix V). 분석된 원소들의 농도를 ppm 또는 ppb 단위에서 물농도로 전환하였으며, 시간의 변화에 따른 차이를 보정하기 위하여 사육수의 주요원소 중의 하나인 Ca으로 나누어 표준화하였다. 그리고 본 연구에서는 이석에서 나타나는 원소들과 사육수의 화학조성의 비교를 용이하게 하기 위해서 8원소(즉, Na/Ca, Mg/Ca, Al/Ca, Cu/Ca, Sr/Ca, Ba/Ca, Mn/Ca와 Zn/Ca)만 분석에 이용하였다.

2002년 3월 사육수는 8원소 중에서 5원소(Na, Sr, Ba, Mg, Mn)/Ca 농도가 지역별로 현저하게 차이가 나는 것을 알 수 있었다(Table 6). Al/Ca, Cu/Ca, Zn/Ca의 경우, 각 지역에서 나타난 값의 범위가 크기 때문에 통계적으로 지역별 차이를 구분하기가 어렵다. 그러므로, 지역별 차이가 현저한 5원소/Ca 농도를 보면, Na/Ca, Sr/Ca, Ba/Ca는 양양 부화장에서 제일 높게 나타났으며, Mg/Ca, Mn/Ca는 울진 부화장에서 제일 높은 값을 보였다. 삼척부화장의 사육수는 Zn를 제외하고는 모두 분석된 원소가 세 지역의 사육수 중에서 가장 낮은 값을 나타냈다.

2002년 10월의 지역별 사육수의 화학조성 결과는 Mn/Ca, Al/Ca의 값이 측정되지 않은 지역이 있어서 6원소/Ca 비율만으로 지역의 차이

를 살펴보았다. 대체적으로, 봄철에 측정된 결과와 유사한 경향이 있었으나 Na/Ca, Mg/Ca, Cu/Ca는 울진부화장에서 가장 높은 값을 보였으며, Sr/Ca, Ba/Ca, Zn/Ca는 양양부화장에서 가장 높았다. 한편, 측정된 모든 원소는 삼척 부화장에서 가장 낮은 값을 보였다(Table 6). 또한, 봄철과 마찬가지로 Zn/Ca의 경우에는 측정치의 범위가 매우 컸다.

2003년 3월의 지역별 사육수의 화학조성 결과도 전년도의 봄·가을 결과와 유사하였다. Cu/Ca를 제외한 7원소/Ca의 농도값이 지역별로 명확하게 차이가 나타나 사육수를 지역별로 구별할 수 있었다. 각 원소의 지역별 농도는 2002년 3월에 측정된 사육수의 농도패턴과 거의 동일하게 나타났는데, 예를 들면, Na/Ca, Sr/Ca, Ba/Ca는 양양부화장에서 제일 높게 나타났으며, Mg/Ca, Mn/Ca는 울진부화장에서 제일 높은 값을 보였다. 반면 삼척부화장의 사육수에서는 모든 원소가 다른 부화장에 비하여 가장 낮은 값을 나타내고 있다(Table 6).

위의 결과를 토대로, 2001년부터 2003년까지의 3년 동안 우리나라의 3곳의 연어부화장 연어 사육수를 구성하는 금속농도가 지역별로 차이가 있음을 알 수 있었다. 그리고 각 사육수의 화학조성은 연구기간 동안 큰 변화를 보이지 않았다. 특히, Sr/Ca, Ba/Ca가 연어가 방류되는 시기인 3월과 소상하는 시기인 10월에서 모두 양양 남대천에서 가장 높은 값을 나타내었고, 삼척부화장에서 가장 낮은 값을 나타내어 계절적의 변화에 따라 농도의 차이는 있지만 지역별로 나타나는 사육수의 농도의 양상은 안정적이라는 사실을 보여주었다. 또한, 2002년과 2003년의 연변동을 살펴보면, Sr/Ca, Ba/Ca의 농도가 연어가 방류되는 시

기인 2002년과 2003년 3월에서 모두 양양부화장에서 가장 높은 값을 나타내었고, 삼척부화장에서 가장 낮은 값을 나타내었다. 즉, Sr/Ca, Ba/Ca의 절대농도는 계절적으로, 그리고 해마다 다르게 나타나지만 지역별로 나타나는 농도의 순위는 항상 같았다.

Table 6. Concentrations of 8 element/Ca in reared water of salmon fry collected from the east coast of Korea in March and October 2002 and March 2003.

study area	sampling time	Mg/Ca mmol/mol	Na/Ca mmol/mol	Sr/Ca μmol/mol	Mn/Ca μmol/mol	Cu/Ca μmol/mol	Zn/Ca μmol/mol	Ba/Ca μmol/mol	Al/Ca μmol/mol
Yangyang	2002 Mar.	274.8	1161.2	4504.3	172.8	67.9	192.2	552.7	713.4
	2002 Oct.	300.4	1066.7	2901.0	1229.4	32.5	199.6	447.1	3429.2
	2003 Mar.	291.2	1184.7	3659.1	477.4	48.0	191.6	348.3	218.6
Samchuk	2002 Mar.	99.3	160.5	515.4	14.3	24.8	590.7	30.6	101.6
	2002 Oct.	85.9	137.5	286.4	n.d	6.7	30.4	18.1	754.7
	2003 Mar.	94.5	154.6	460.3	10.7	6.3	70.6	20.3	55.6
Uljin	2002 Mar.	309.3	938.8	1832.0	2987.7	37.2	122.1	132.5	164.0
	2002 Oct.	335.5	1582.7	1291.2	n.d	35.5	130.2	128.1	n.d
	2003 Mar.	334.3	1052.4	1922.4	2281.3	67.2	1129.8	103.8	128.6

3. 이석 내 금속농도

2001년 3월 연어치어의 예비실험과 마찬가지로 2002년 3월에 채집되어진 연어치어 이석의 화학조성도 지역별로 차이가 났다. 2002년 3월에 채집된 연어치어 이석에서 16원소(Ca, Na, Mg, Si, Al, Mn, Fe, Cu, Zn, Sr, Ba, U, K, Ce, Cd, Pb)가 분석되었다(Appendix VI). 연어치어 이석의 화학조성이 지역별로 통계적으로 유의한 차이가 있는지를 살펴보기 위하여 분산분석(ANOVA)을 실시한 결과, 각각의 채집지역에서 Mg/Ca, Na/Ca, Sr/Ca, Ba/Ca, Mn/Ca와 같은 금속농도에서 지역간에 유의한 차이가 있는 것으로 나타났으며, Zn/Ca, Al/Ca, Cu/Ca은 측정값의 폭이 넓어 지역별로 그다지 차이가 없음을 나타내고 있다(Fig. 5). 삼척과 울진부화장 연어에서 Sr/Ca, Ba/Ca의 농도값이 낮은 반면 양양부화장 연어에서는 확연하게 더 높은 값을 보였다(각각, $F=9075.5$, $P<0.00001$; $F=615.65$, $P<0.00001$). 그리고, Mg/Ca 와 Na/Ca의 농도는 삼척 연어에서 가장 높았으며 Mn/Ca, Zn/Ca, Al/Ca와 Cu/Ca 농도는 울진 연어에서 가장 높았다.

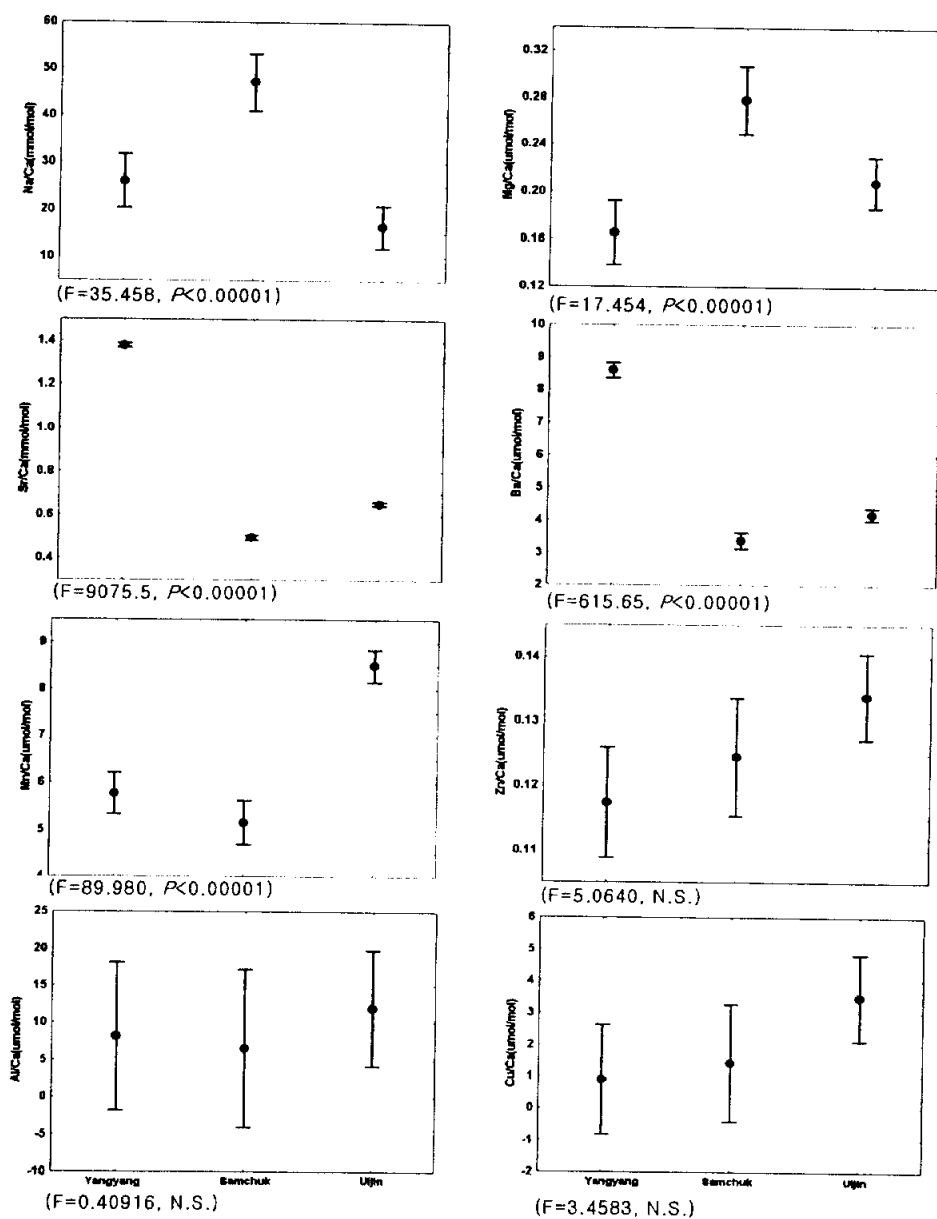


Fig. 5. Mean and standard deviation of 8 elements/Ca concentration ratio in otolith of salmon fry among three study sites in March 2002. Vertical bars denote standard deviations. N.S. denotes non-significant.

4. 사육수와 이석 내 화학조성 관계

이석 내 화학조성과 사육수의 화학조성을 비교했을 때, 우리는 몇몇 원소에서 지역적으로 이석과 사육수의 금속농도 패턴이 일치하는 것을 알 수 있었다. 특히, Sr/Ca, Ba/Ca는 농도의 절대값은 다르지만 사육수와 연어 치어 이석 내 농도 패턴과 동일하게 나타났다(Fig. 6). 예를 들면, 2002년 3월에 채집된 사육수에서 Sr/Ca의 평균농도가 양양부화장에서 약 4500의 값을 가지며 가장 높았으며, 삼척부화장에서 약 500의 값으로 가장 낮게 나타났다. 마찬가지로 연어치어 이석에서는 Sr/Ca의 평균농도가 양양 연어치어 이석에서 약 1400의 값을 보였으며, 삼척 연어에서 약 500의 값을 나타냈다. 2001년 3월에 채집된 연어치어 이석과 2001년 6월에 채수된 사육수의 화학조성 그리고 2002년 3월에 채집한 연어치어 이석과 사육수의 화학조성 중에서 8원소/Ca 비율의 평균값으로 회귀분석을 실시하였을 때, 사육수와 연어치어 이석 사이에서 5원소(Sr, Ba, Al, Zn, Cu)의 평균농도는 유의한 회귀직선관계식을 가지는 것을 알 수 있었다(Fig. 7). 5원소에서 사육수와 연어치어 이석의 회귀직선관계식은 아래와 같다.

$$[\text{Sr/Ca}]_{\text{otolith}} = 0.27[\text{Sr/Ca}]_{\text{water}} + 173.9; r^2 = 0.88, n=6$$

$$[\text{Ba/Ca}]_{\text{otolith}} = 0.01[\text{Ba/Ca}]_{\text{water}} + 1.7; r^2 = 0.83, n=6$$

$$[\text{Al/Ca}]_{\text{otolith}} = 0.13[\text{Al/Ca}]_{\text{water}} - 22.3; r^2 = 0.90, n=6$$

$$[\text{Zn/Ca}]_{\text{otolith}} = 0.08[\text{Zn/Ca}]_{\text{water}} + 89.1; r^2 = 0.79, n=6$$

$$[\text{Cu/Ca}]_{\text{otolith}} = 0.02[\text{Cu/Ca}]_{\text{water}} + 1.5; r^2 = 0.80, n=6$$

위의 결과를 바탕으로 시간의 변화에 관계없이 연어치어 이석을 구성하고 있는 5원소는 다른 어떠한 요인보다 연어치어가 서식하던 물의 화학조성의 영향을 많이 받는다고 할 수 있다.

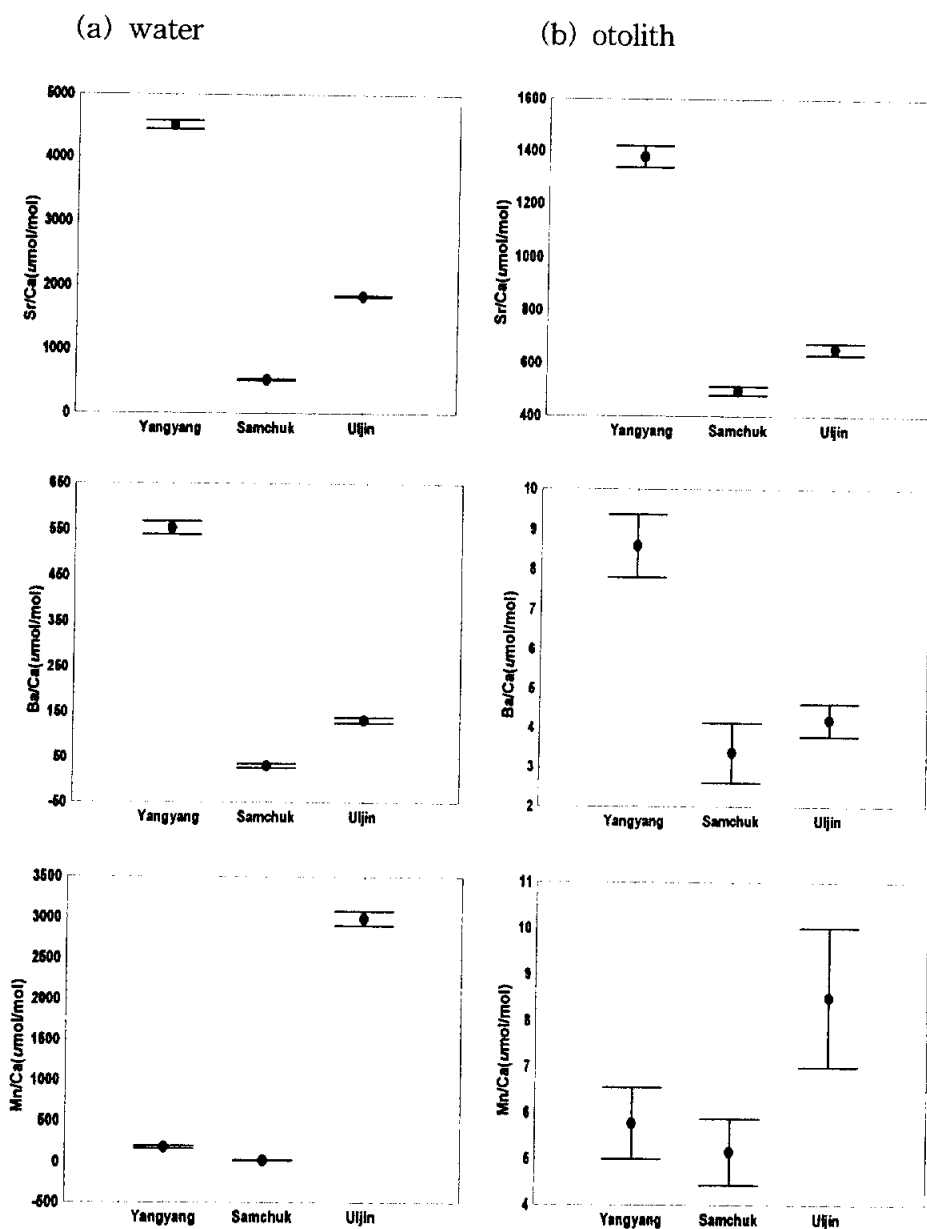


Fig. 6. Comparison of Sr/Ca, Ba/Ca and Mn/Ca ratios in reared water and otolith of salmon fry collected in March 2002.

Vertical bars denote standard deviations.

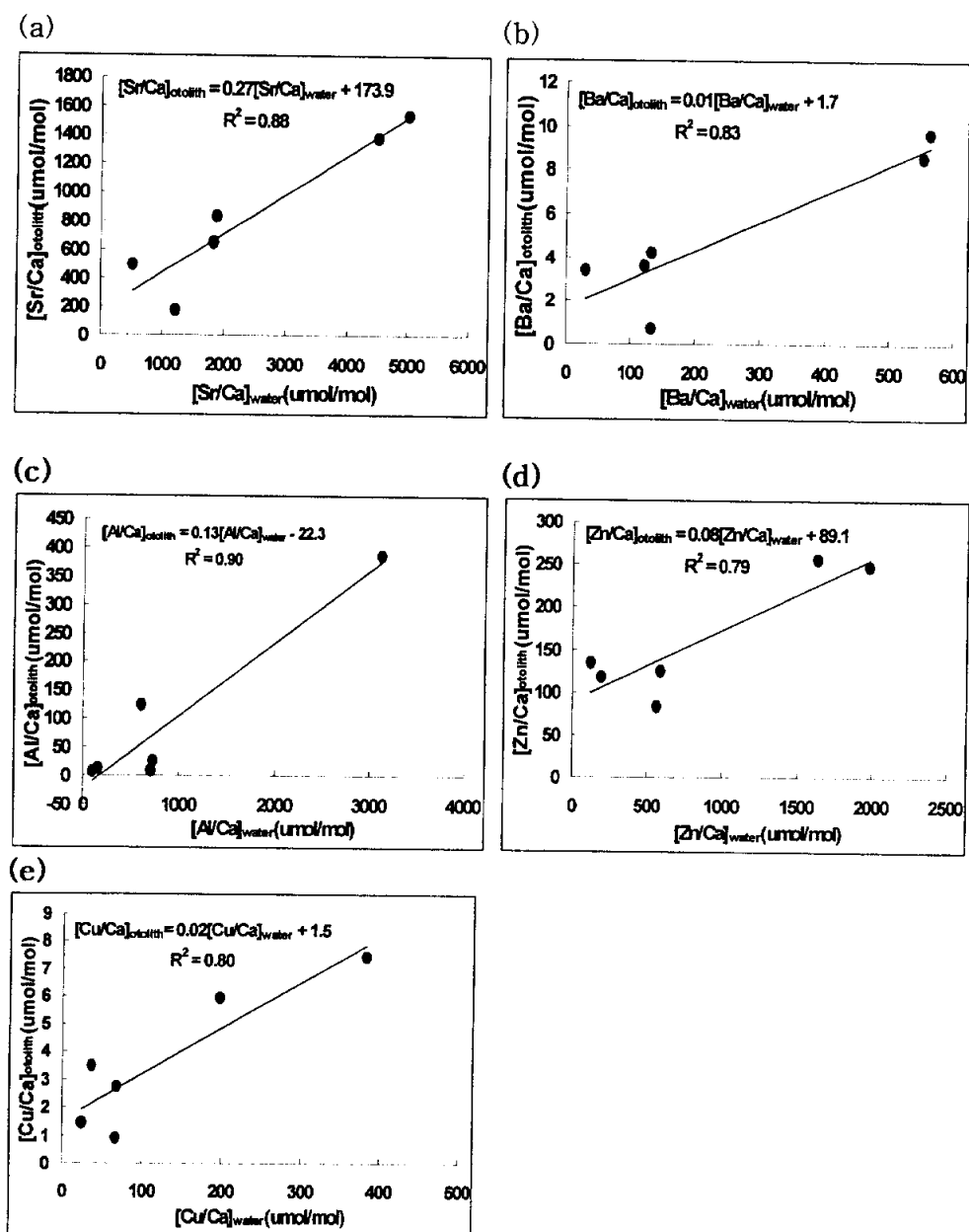


Fig. 7. Relationship between the mean concentration of (a) Sr (b) Ba (c) Al (d) Zn (e) Cu in the otolith of salmon fry and reared water. Samples were collected from the three sites of the east coast of Korea during March, June 2001 and March 2002.

5. 연어치어의 계군분리

연어치어 이석과 그들이 서식했던 사육수의 화학조성을 비교하였을 때, 지역적으로 Sr/Ca, Ba/Ca와 같은 원소들은 지역별 부화장의 사육수를 구분할 수 있는 열쇠가 되며, 또한 지역별 연어 치어를 구분하는 수단이 될 수 있다는 것을 알 수 있었다. 즉, 이 두 가지 원소만으로도 연어치어가 태어난 지역과 서식했던 장소를 어느 정도 구별할 수 있다는 것이다. 연어치어 이석 내 금속농도를 이용하여 연어의 계군을 통계적으로 구분하기 위해 판별분석(discriminant analysis)을 실시하였다. 8원소:Ca 비율농도(즉, Na/Ca, Mg/Ca, Al/Ca, Cu/Ca, Sr/Ca, Ba/Ca, Mn/Ca와 Zn/Ca)로 판별분석을 시행하였을 때, 3개의 지역별 계군으로 명확하게 분리되어 표현되었다(Fig. 8). 첫 번째 판별함수에 의해 양양부화장의 연어치어가 삼척과 울진부화장에서 분리되었고, 두 번째 판별함수로 삼척과 울진부화장 연어가 완전하게 나누어졌다.

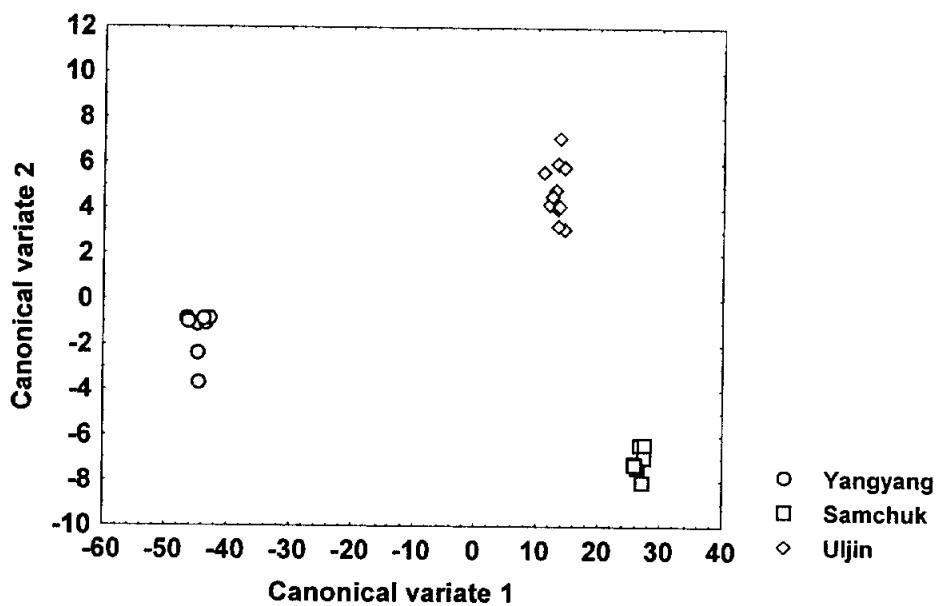


Fig. 8. Discriminant analysis with 8 elements/Ca concentration ratio to distinguish stock and natality of chum salmon fry from the east coast of Korea.

고 찰

미세화학물질의 분석 기술이 고도로 발달함에 따라 어류의 이석 내 미세화학조성 분석이 가능해졌으며, 어류의 이석을 구성하는 미량원소나 동위원소의 함량농도를 이용하여 어류의 생태, 생리, 생활사 등에 관한 연구들이 활발하게 진행되고 있다. 본 연구에서는 이석 내 화학조성을 이용하여 연어치어의 계군분리를 실시하였지만, 이외에도 이석 내 동위원소를 이용한 분석들도 활발히 전개되고 있다. 예를 들면, 고대의 화석에서 유공충이나 조개의 패각에서 탄소($\delta^{13}\text{C}$)나 산소($\delta^{18}\text{O}$) 동위원소값을 파악하여 고기후나 서식지의 온도(Grossman and Ku, 1986)를 파악할 수도 있으며, 어류 이석 내 탄소나 질소($\delta^{15}\text{N}$), 그리고 산소 동위원소값을 이용하여 먹이그물에서 어류의 생태학적 위치(Sugisaki and Tsuda, 1995), 생활사(Gao and Beamish, 1999), 연령추정(Campana and Jones, 1998) 등의 연구를 하기도 한다. 어류 이석 내 화학조성을 이용하여 연구하는 방법에는 이처럼 다양한 방법이 존재하지만 본 연구에서는 어류의 계군분리라는 목적에 맞추어 연어치어 이석 내 금속농도를 비교하는 방법을 선택하였다.

이석 내 화학조성을 이용한 연구의 기초적인 가정은 세 가지로 요약할 수 있다. 첫 번째는 어류의 이석 내 구성물질은 형성된 후 변하지 않는다는 것이고, 두 번째는 어류가 서식하는 물리적·화학적 환경의 차이가 어류의 이석을 구성하는 원소들의 농도값 차이로 반영된다는

것이다(Gunn *et al.*, 1992). 현대 과학의 수준으로 두 번째 가정에서 제시한 ‘어떠한 환경요인이 어류의 이석을 구성하는 원소에 영향을 미치는가?’라는 질문에 대하여 명확히 알 수는 없지만, 향후 그것을 알 수 있다면, 어류 서식지의 지리적 차이 혹은 환경적 특징을 더 명확히 구분할 수 있을 것이다. 그리고 세 번째 가정은 서식지의 차이를 가지는 어류의 이석 내 화학조성은 시간적 변동보다 지리적 변동이 더 커야 한다는 것을 들 수 있다. 이석 내 원소함량 농도가 지역별로 다르다고 하더라도 이러한 결과는 시간이 지나도 크게 변화하지 않아야 태어난 지역이 다른 어류들을 분리하는 기초자료로 활용할 수 있을 것이다. 이석 내 화학조성이 지리적이고 공간적인 차이보다 시간적인 차이가 더 크다면 이석을 이용한 계군분리 방법은 유용하지 않기 때문이다.

본 연구에서 지역별 연어치어 이석과 사육수의 화학조성 분석은 연어치어가 태어난 지역과 계군을 분리하기 위한 기초자료로 사용하기 위하여 실시되었다. 먼저, 채집된 연어치어는 이석 내 화학조성을 분석하기 전에 측정된 성장식에서 지역별로 동일한 연령임에도 불구하고 크기에 있어서 차이를 보였다. 이러한 결과는 각 지역별 연어부화장 사육수의 온도차에서 비롯되었다고 생각된다. 하지만 불행하게도 사육수의 온도 측정자료가 규칙적으로 정확하게 기록된 것이 없어서 더 깊은 연구는 할 수가 없었다. 그러나, 이와 유사한 결과로서 대서양 연어, *Salmo salar* 부상자어를 다양한 수온에서 사육시킬 때 적정수온 범위 내에서는 고온일수록 부상자어의 길이성장이 높다는 보고가 있었다(Peterson *et al.*, 1977). 연어치어 이석의 화학조성 분석에 있어서 분석

시료의 최소측정가능 무게가 0.01g 이었기 때문에 연어치어 이석의 화학조성결과에서 개체간의 차이를 밝혀낼 수는 없었다. 하지만, 20마리에서 40마리정도의 연어치어 이석을 한 시료로 분석했기 때문에 개체간의 이석 화학조성 결과에 따른 오차값은 무시할 수 있다고 생각되어진다.

이석 내 화학조성-물의 화학조성과의 관계

양양, 삼척, 울진부화장에서 채집된 연어의 사육수와 이석 내의 원소함량 농도값은 지역별로 차이가 있다는 것을 알 수 있었으며, 지역별로 물의 화학조성에서 차이를 보이는 것은 지역적 특성을 반영하기 때문이라고 생각된다. 특히, 지역 부화장의 사육수를 구성하는 원소중에서 Sr/Ca와 Ba/Ca의 농도값은 지역을 잘 구분하였으며, 연어치어의 이석 내로 잘 반영되는 것을 알 수 있었다. 즉, 환경수와 이석을 구성하는 원소함량 농도값에서 지리적인 차이를 초래하는 근본요인이나 메커니즘에 대한 연구가 아직 완전하지는 않고(Rooker, 2002), 이석을 구성하는 모든 원소에 적용되는 것은 아니지만 환경수의 화학조성 중에서 Sr/Ca, Ba/Ca, Al/Ca, Zn/Ca, Cu/Ca와 같은 5 가지 원소의 비율은 그곳에 서식하고 있는 연어치어의 이석에 잘 반영되는 것을 알 수 있었다. Campana(1999)는 해양산 어류와 담수산 어류의 이석 내 화학조성 농도를 비교하였을 때, 많은 원소중에서 Sr, Ba, Mn, Zn, Pb의 농도가 환경수의 농도와 비슷한 경향을 보이고 있음을 보고하였다. 본 연구 결과는 Campana(1999)의 연구 결과와도 거의 유사함을 보이고 있다. 본

연구에서 이석을 구성하는 원소에 영향을 미치는 다른 요인에 관한 연구가 부족했다고 생각된다. 부화장별로 먹이는 배합사료를 사용했기 때문에 지역적 차이가 없어서 영향을 미치는 요인에서 제외시켰지만, 온도, 스트레스, 어류의 생리상태가 이석의 원소구성에 미치는 영향 등을 고려하지 않았기 때문에 다른 요인에 의한 영향이 있을 가능성도 있을 것이라 생각되며, 이들 요인에 관한 연구도 필요하다고 생각된다. 하지만, 특별하게도 연어치어 이석 내 Sr, Ba, Al, Zn, Cu과 Ca의 비율은 다른 요인에 의한 영향보다 물의 화학조성의 영향이 크게 반영된다고 생각된다. 어류의 이석 내 화학조성을 이용한 연구결과에서 Sr과 Ba는 지역적 차이를 가장 잘 나타내는 원소로 밝혀지고 있다. Sr과 Ba는 2가 원소로서 다른 원소들에 비해서 이석 내로 Ca을 대신하여 잘 쌓인다고 알려져 있다. Campana(1999)는 물에 녹아있는 Sr, Zn, Mn, Ba과 같은 특별한 금속원소들만 이석에 잘 반영된다는 것을 보고하였는데, 우리의 결과는 4가지 원소 중 Sr과 Ba 그리고 Zn만이 잘 반영되었다.

계군분석

Limburg(1995)는 담수의 Sr은 지리적구분을 유용하게 하며, 지리학 적 차이나 기후상태에 따라서 변한다라고 보고하였다. Rooker(2001)는 대서양 bluefin tuna의 이석에서 Sr/Ca, Ba/Ca의 농도값으로 서부와 동부보육장을 구분하였다. 연어치어의 계군분리를 위하여 지정된 연구지역은 동해안에 위치한 55~140 km안에 위치하는 3개의 부화장이었다. 거리상으로 짧은 거리임에도 불구하고, 각 지역의 화학적 특징은 차이

가 컸으며, 각 지역에 서식하는 어류 이석의 화학조성은 환경수의 화학 조성으로부터 반영이 된다는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 Edmonds *et al.*(1989; 1992)와 Patterson *et al.*(1999)의 연구와도 동일하다. Patterson *et al.*(1999)은 70~180 km사이의 공간에서 미성어 Nassau grouper (*Epinephelus striatus*)의 이석 내 화학조성을 분석하여 지역적 차이를 설명하였다.

또한, 이렇게 지역별로 차이가 나는 연어치어의 이석 내 화학조성이 년변동을 가지지 않고 동일하다면 계군분리의 기초자료로 계속 사용할 수 있을 것이다. 이석 내 화학조성이 계군분리나 생활사 추적과 같은 자료로 이용되기 위해서는 시간이 지나도 농도값이 안정적이어야 하며 계절적 변동이나 연간변동이 없어야 한다. 본 연구에서는 연어치어의 사육수와 이석의 Sr/Ca와 Ba/Ca 농도값에서 계절에 따라 또는 해가 달라짐에 의한 변화는 있었지만 지역별로 가지는 농도값의 패턴에서는 계절변동이나 년변동은 크지않았고, 시간적 변화에 의한 차이가 지리적 차이보다 적게 나타났기 때문에 계군분리의 기초자료로 사육수나 이석 내의 Sr/Ca와 Ba/Ca를 활용할 수 있다고 생각된다. 어류 이석 내 화학 조성의 시간적 변동에 관한 연구는 많은 연구자들에 의해 연구되고 있다(Patterson *et al.*, 1999; Campana *et al.*, 2000). 또한, 사육수와 연어 치어 이석에서 동일하게 존재하는 8 금속원소를 이용한 판별분석도 연 어치어가 서식하던 지역을 구분하는데 용이한 통계적 방법이었다. 본 연구로부터, 연어 치어 이석의 화학조성과 그들이 서식하던 사육수의 화학조성을 비교, 분석하였을 때 어류가 서식하던 물의 화학조성이 어

류이석의 화학조성과 상호관계를 가진다는 것을 규명할 수 있었으며, 환경적 차이로 인한 이석 내 화학조성의 차이로 부화장별로 계군을 분리할 수 있었다.

향후 연구에서는 동해바다에서 잡힌 연어 성어 이석의 핵 부분을 레이저 소각 ICP-MS(laser-ablation ICP-MS)라는 기계를 이용하여 분석한 후, 연어치어의 화학조성과 비교분석하여 바다에서 연어를 어획했을 때 계군분리가 가능한지를 연구할 것이며, 이러한 기술을 타 어종에도 적용시키려 한다.

요 약

한국산 연어의 계군을 분리하는 방법을 개발하기 위하여 연어의 이석과 연어가 서식하던 사육수간의 미세화학조성의 관계를 연구하였다. 연어의 사육수는 한국 동해안에 위치하고 있는 세 지역 부화장(양양, 삼척, 울진)에서 각각 2002년 3월과 10월 그리고 2003년 3월에 채수되었으며, 부화장에서 사육된 연어치어는 2002년 3월에 채집되었다. 연어 사육수와 연어치어의 이석을 구성하는 미량원소의 농도는 한국기초과학지원연구원에서 유도결합플라즈마질량분석기(ICP-MS)로 분석되었다.

사육수와 연어치어 이석에서 각각 14원소와 16원소가 측정되었으며, 측정된 원소농도는 Ca로 표준화하였다. 사육수와 이석 내 화학조성은 연구기간 동안 유의하게 변화하지 않았다. 또한, 사육수에서 Sr/Ca, Ba/Ca는 절대농도는 아니지만 연어치어의 이석 내로 잘 반영되는 것을 알 수 있었다. 이러한 2원소는 다른 화학적 환경을 가지는 지역별 부화장을 식별하는 지시자라 말할 수 있다. Sr/Ca와 Ba/Ca의 값은 시간적 차이보다 지리적 차이가 더 크게 나타났다. 또한, 8 원소/Ca(즉 Na/Ca, Mg/Ca, Al/Ca, Cu/Ca, Sr/Ca, Ba/Ca, Mn/Ca와 Zn/Ca)를 이용한 판별 분석은 계군의 고향과 일치하여 계군의 분리를 잘 나타내었다. 결과적으로, 이석 내 화학 조성 분석은 서식지별 연어 치어를 구분하는 수단, 즉, 연어계군을 분리시키는 방법으로 유용하다는 것을 알 수 있었다.

향후 바다에서 어획된 연어성어의 핵부분의 화학조성을 분석한 후, 지역별 연어치어의 화학조성과 비교하면 계군을 구분할 수 있을 것으로 생각한다.

감사의 글

먼저 부족한 저를 학문의 길에 입문할 수 있도록 해주시고 깊은 사랑과 커다란 가르침을 주신 김 수암 교수님께 진심으로 존경을 표하며 감사의 말씀을 드립니다. 또한 아낌없는 관심과 조언으로 보다 좋은 글이 될 수 있도록 세심하게 논문을 심사해주신 장 창익 교수님과 최만식 박사님께 깊은 감사를 드립니다. 아울러 많은 가르침과 관심을 주신 진 평 교수님, 홍 성운 교수님, 강 용주 교수님, 유 명숙 교수님, 남 기완 교수님, 백 해자 교수님께도 감사를 드립니다.

본 논문의 연구를 위해서 연어와 사육수 채집에 도움을 주신 양양 내수면 연구소, 삼척 내수면 개발 사업소, 울진 민물고기 연구소 관계자분들과 화학분석을 위해 도움을 주신 기초과학지원연구원분들 정말 감사합니다. 그리고 논문에 대해 많은 관심을 가져주시고 논문해석과 분석과정에 도움을 주신 성 기백 박사님, 이 재봉 연구사님, 이 용우 박사님, 신 형철 박사님, 강 형구 박사님, 황 동훈선배님께도 감사의 마음을 전합니다.

연구실에서 부족한 저를 사랑으로 가르쳐주시고 학문적으로 정신적으로 큰 버팀목이 되어주신 수경언니, 후배지만 동기같고 언제나 열심히 하는 경미, 윤선 그리고 수연, 논문실험을 적극적으로 도와준 우리의 착하고 이쁜 후배들인 현주, 내은, 은정, 현우 모두에게 고마운 마음을 전합니다. 또한 연구실선배님처럼 많은 도움을 주신 장 창익 교수님

연구실 선배님들 정말 고맙습니다.

논문쓰다는 핑계로 무시했던 나를 지금까지 아끼고 사랑해주며 늦은 시간까지 실험을 도와준 화현이, 함께 밤을 지새우던 명희, 든든한 후원자 병호 그리고 애정을 가지고 묵묵히 지켜봐준 햇살가족들과 드리머가족들에게도 깊은 감사의 뜻을 전합니다.

마지막으로 어려운 환경속에서도 항상 저를 믿어 주시고 사랑으로 정성을 다하시는 어머니와 어머니를 지켜주시는 분께 머리 숙여 깊이 감사의 말씀을 드립니다. 모두의 애정어린 관심과 따뜻한 배려가 있었기에 이 같은 작은 결실을 얻을 수 있었습니다. 부족한 저이지만 이 작은 결실을 바탕으로 더 나은 모습을 보여드릴 수 있도록 계속 정진하겠습니다.

참 고 문 헌

- KORDI, 2002. 우리나라 방류 연어의 계군 분석 및 생활장, 회유경로의 파악. 해양수산부 수산특정연구개발사업 보고서.
- 성기백, 1999. 한국산 연어의 생물학적 특성 및 집단유전학적 연구. 국립 부경대학교 대학원 박사학위논문, p. 1-125
- 장창익, 1991. 수산자원생태학, 해양학강의 시리즈(I). 우성문화사, p. 29
- Bath, G.E., Thorrold, S.R., Jone, C.M., Campana, S.E., McLaren, J.W. and Lam, J.W.H. 2000. Strontium and barium uptake in aragonitic otoliths of marine fish. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64:1705-1714.
- Begg, G.A. and Waldman, J.R. 1999. An holistic approach to fish stock identification. *Fisheries Research*, 43:35-44.
- Brown, P. and Harris, J.H. 1995. Strontium batch-marking of golden perch (*Macquaria ambigua Richardson*) and trout cod (*Maccullochella macquariensis*) (Cuvier). In: Secor DH, Dean, J.M., Campana, S.E. (eds) Recent developments in fish otolith research. University of South Carolina Press. Columbia, SC, p. 693-701.
- Campana, S.E. and Neilson, J.D. 1985. Microstructure of Fish Otoliths. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 42:1014-1032.
- Campana, S.E., Gagné, J.A. and McLaren, J.W. 1995. Elemental fingerprinting of fish otoliths using ID-ICPMS. *Mar. Ecol.*

Prog. Ser., 122:115-120.

Campana, S.E. and Jones, C.M. 1998. Radiocarbon from nuclear testing applied to age validation of black drum, *Pogonias cromis*. *Fish Bull.*, 96:185-192.

Campana, S.E. 1999. Chemistry and composition of fish otoliths: pathways, mechanisms and applications. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 188:263-297.

Campana, S.E., Chouinard, G.A., Hanson, J.M. and Fréchet, A. 1999. Mixing and migration of overwintering cod stocks near the mouth of the Gulf of St. Lawrence. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 56:1873-1881.

Campana, S.E., Chouinard, G.A., Hanson, J.M., Fréchet, A. and Brattey, J. 2000. Otolith elemental fingerprints as biological tracers of fish stocks. *Fisheries Research*, 46:343-357.

Campana, S.E. and Thorrold, S.R. 2001. Otoliths, increments, and elements: keys to a comprehensive understanding of fish populations? *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 58:30-38.

Edmonds, J.S., Moran, M.J., Caputi, N. and Morita, M. 1989. Trace element analysis of fish sagittae as an aid to stock identification: pink snapper (*chrysophrys auratus*) in Western Australian waters. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 46:50-54.

Edmonds, J.S., Lenanton, R.C. J., Caputi, N. and Morita, M. 1992. Trace elements in the otoliths of yellow-eye mullet

- (*Aldrichetta forsteri*) as an aid to stock identification. *Fisheries Research*, 13:39-51.
- Farrell, J. and Campana, S.E. 1996. Regulation of calcium and strontium, deposition on the otoliths of juvenile Tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Comp. Biochem. Physiol.*, 115A: 103-109.
- Gallahar, N.K. and Kingsford, M.J. 1996. Factors influencing Sr/Ca ratios in otoliths of *Girella elevata*: an experimental investigation. *J. Fish Biol.*, 48:174-186.
- Gao, Y.W. and Beamish, R.J. 1999. Isotopic composition of otoliths as a chemical tracer in population identification of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 56:2062-2068.
- Gillanders, B.M. and Kingsford, M.J. 2000. Elemental fingerprints of otoliths of fish may distinguish estuarine 'nursery' habitats. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 201:273-286.
- Grossman, E.L. and Ku, T-L. 1986. Oxygen and carbon isotope fractionation in biogenic aragonite: temperature effects. *Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)*, 59:59-74.
- Groot, C. and Margolis, L. 1991. Pacific Salmon Life Histories. UBC Press, Vancouver, Canada, pp. 564
- Gunn, J.S., Harrowfield, I.R., Proctor, C.H. and Thresher, R.E. 1992. Electron probe microanalysis of fish otoliths-evaluation of techniques for studying age and stock discrimination. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 158:1-36.

- Halden, N.M., Mejia, S.R., Babaluk, J.A., Reist, J.D., Kristofferson, A.H., Campbell, J.L. and Teesdale, W.J. 2000. Oscillatory zinc distribution in Arctic char (*Salvelinus alpinus*) otoliths: The result of biology or environment? *Fisheries Research*, 46:289-298.
- Hanson, P.J. and Zdanowicz, V.S. 1999. Elemental composition of otoliths from Atlantic croaker along an estuarine pollution gradient. *J. Fish Biol.*, 54:656-668.
- Hoff, G.R. and Fuiman, L.A. 1995. Environmentally induced variation in elemental composition of red drum (*Sciaenops ocellatus*) otoliths. *Bull. Mar. Sci.*, 56:578-591.
- Kalish, J.M. 1989. Otolith microchemistry: validation of the effects of physiology, age and environment on otolith composition. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 132:151-178.
- Limburg, K.E. 1995. Otolith strontium traces environmental history of subyearling American shad *Alosa sapidissima*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 119:25-35.
- Milton, D.A. and Chenery, S.R. 2001. Sources and uptake of trace metals in otoliths of juvenile barramundi (*Lates calcarifer*). *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 50:855-868.
- Patterson, H.M., Thorrold, S.R. and Shenker, J.M. 1999. Analysis of otolith chemistry in Nassau grouper (*Epinephelus striatus*) from the Bahamas and Belize using solution-based ICP-MS., *Coral Reef*, 18:171-178.

- Peterson, R.H., Spinney, H.C.E. and Sreedharan, A. 1977. Development of Atlantic Salmon (*Salmo salar*) Eggs and Alevins Under Varied Temperature Regimes. *J. Fish. Res. Board Can.*, 34:31-43.
- Rieman, B.E., Myers, D.L. and Nielsen, R.L. 1994. Use of otolith microchemistry to discriminate *Oncorhynchus nerka* of resident and anadromous origin. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 51:68-77.
- Rooker, J.R., Secor, D.H., Zdanowicz, V.S. and Itoh, T. 2001. Discrimination of northern bluefin tuna from nursery areas in the Pacific Ocean using otolith chemistry. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 218:275-282.
- Rooker, J.R., Secor, D.H., Zdanowicz, V.S., Metrio, G.D., Relini, L.O., Deflorio, M., Santamaria, N., Palandri, G. and Relini, M. 2002. Otolith elemental fingerprints of Atlantic bluefin tuna from eastern and western nurseries. Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT, 54:198-506.
- Secor, D.H. 1992. Application of otolith microchemistry analysis to investigate anadromy in Chesapeake Bay striped bass *Morone saxatilis*. *Fish. Bull. U.S.*, 90:798-806.
- Schroder, S.L., Knudsen, C.M. and Volk, E.C. 1995. Marking salmon fry with strontium chloride solutions. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 52:1141-1149.
- Sugisaki, H. and Tsuda, A. 1995. Nitrogen and carbon stable isotopic ecology in the ocean: The transportation of organic materials through the food web. *Biogeochemical Processes and Ocean Flux*

in the Western Pacific, Eds. H. Sakai and Y. Nozaki, p. 307-317.

Thresher, R.E., Protocor, C.H., Gunn, J.S. and Harrowfield, I.R. 1994. Anevaluation of electron-probe microanalysis of otoliths for delineation and identification of nursery areas in asouthern temperate groundfish, *Nemadactylus macropterus* (Cheilodactyli-dae). *Fish Bull.*, 92:817-840.

Thresher, R.E. 1999. Elemental composition of otoliths as a stock delineator in fishes. *Fisheries Research*, 43:165-204.

Thorrold, S.R., Jones, C.M. and Campana, S.E. 1997. Response of otolith microchemistry to environmental variations experienced by larval and juvenile Atlndtic croaker (*Micropogonias undulatus*). *Limnol. Oceanogr.*, 42:102-111.

Thorrold, S.R., Jones, C.M., Campana, S.E., McLaren, J.W. and Lam, J.W.H. 1998. Trace element signatures in otoliths record natal river of juvenile American shad (*Alosa sapidissima*). *Limnol. Oceanogr.*, 43:1826-1835.

Townsend, D.W., Radtke, R.L, Corwin, S. and Libby, D.A. 1995. Strontium:calcium ratios for hindcasting larval cod *Gadus morhua* distributions relative to water masses on Georges Bank. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 119:37-44.

Tzeng, W.N. and Tsai, Y.C. 1994. Changes in otolith microchemistry of the Japanese eel, *Anguilla japonica*, during its migration from the ocean to the rivers of Taiwan. *J. Fish Biol.*, 45:671-683.

Tzeng, W.N., Severin, K.P., Wickstrom, H. and Wang, C-H. 1999.
Strontium bands in relation to age marks in otoliths of
European Eel *Anguilla anguilla*. *Zoological Studies*, 38:452-457.

Appendix I . Microchemistry of salmon fry otolith at three hatcheries in March 2001(continued).

study	Ca	Na	Mg	Si	K	Ai	Mn	Fe	Cu	Zn	Sr	Ba	U
area	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppb
Yangyang	33	2625	788	<10	988	85.7	3.5	<10	3.9	133	1108	10.9	16.5
Samchuk	32	2390	771	12.7	N.D	5.3	0.8	<10	1.4	43	121	0.8	<10
Uljin	33	2754	365	<10	508	27.6	3.9	<10	3.1	138	599	4.1	13.5

Appendix I. Microchemistry of otolith on various fish species in June 2001.

study area	species	Ca %	Na ppm	Mg ppm	Si ppm	K ppm	Al ppm	Mn ppm	Fe ppm	Cu ppm	Zn ppm	Sr ppm	Ba ppm	U ppb
Yangyang	sweet smelt	36	2672	25	<10	417	3.4	9	<10	15.5	50	1883	8.1	13.4
Yangyang	sea rundace	37	1603	158	26.3	171	4.9	2.5	<10	0.8	35	1198	7.8	17.3
Yangyang	mullet	35	2473	24	<10	446	<1	4.5	<10	2.5	8	2512	55	<10
Samchuk	trout	35	2849	22	<10	414	<1	1.8	<10	0.5	34	236	1	13
Samchuk	rainbow trout	35	2748	25	<10	428	<1	1.7	<10	1.5	39	248	0.9	16.1
Samchuk	sweet smelt	35	2723	18	<10	461	2.3	31.2	<10	3	176	4742	31.7	85.9
Uljjin	sea rundace	36	589	380	<10	0	<1	2	<10	1.1	15	304	0.3	<10
Uljjin	striped shinner	35	952	230	<10	91	<1	12.5	<10	1	44	315	7.5	<10
Uljjin	Korean dark sleeper	35	2643	16	<10	179	<1	4.1	<10	0.4	2	779	14.4	<10
Uljjin	Korean dark sleeper	35	2906	20	<10	142	<1	7.7	<10	0.4	5	773	9.9	<10
Uljjin	pale chub	34	719	238	<10	64	<1	7.9	<10	0.9	30	64	0.5	<10
Uljjin	sweet smelt	36	2808	35	13.5	392	9.3	1.2	<10	0.8	52	734	2.3	<10
Uljjin	goby minnow	35	2473	11	<10	191	4	0.9	<10	0.9	4	591	10.3	<10
Uljjin	goby minnow	35	2240	11	<10	184	<1	1	<10	0.5	4	644	10.6	<10

Appendix II. Microchemistry of reared water at three hatcheries in June 2001.

study area	Ca ppm	Na ppm	Mg ppm	Si ppm	Al ppb	Mn ppb	Fe ppm	Cu ppb	Zn ppb	Sr ppm	Ba ppb	U ppb	Co ppb	Ni ppb	K ppm
Yangyang	7.59	12.12	2.7	3.49	16.17	4.1	0.02	6.91	15.01	0.08	14.96	0.02	0.07	0.71	1.96
Yangyang	8.04	12.64	2.85	3.86	13.93	4.15	<0.02	3.41	30.33	0.09	15.28	0.04	0.08	0.62	1.97
Yangyang	8.05	12.53	2.88	3.88	19.58	4.18	<0.02	3.91	31.8	0.09	15.5	0.03	0.07	0.64	1.98
Samchuk	33	3.21	2.92	2.32	13.93	4.15	<0.02	3.41	30.33	0.09	15.28	0.04	0.08	0.62	0.8
Samchuk	34.3	3.22	3.01	2.42	19.58	4.18	<0.02	3.91	31.8	0.09	15.5	0.03	0.07	0.64	0.79
Uljin	9.57	6.17	2.87	5.3	5.46	9.78	0.03	3.37	39.67	0.04	4.69	0.11	<0.05	0.57	1.32
Uljin	12.4	5.48	3.14	3.61	3.16	9.69	<0.02	3.39	14.61	0.05	4.35	0.09	<0.05	0.49	1.31

Appendix III. Microchemistry of reared water at three hatcheries in March 2002.

study area	Ca ppm	Na ppm	Mg ppm	Si ppm	Al ppb	Mn ppb	Fe ppb	Cu ppb	Zn ppb	Sr ppb	Ba ppb	U ppb
Yangyang	6.06	4.11	1.42	3.67	3.27	1.48	6.88	0.77	2.57	59.33	11.37	0.03
Yangyang	6.01	3.93	1.42	3.72	2.53	1.38	4.47	0.53	1.22	59.52	11.49	0.02
Samchuk	30.4	2.91	2.58	1.68	2.3	0.69	3.3	1.47	51.27	33.93	3.48	0.12
Samchuk	30.2	2.67	2.57	1.67	1.48	0.47	2.28	1.01	14.85	33.89	3.01	0.11
Samchuk	30.3	2.79	2.58	1.67	2.44	0.62	3.42	1.09	21.59	34.59	3.05	0.11
Uljin	9.09	4.99	2.42	4.46	1.33	37.62	24.98	0.63	2.62	36.48	4.2	0.11
Uljin	9.26	4.89	2.44	4.48	0.69	37.52	23.07	0.45	1.02	37.01	4.13	0.11

Appendix IV. Microchemistry of reared water at three hatcheries in October 2002.

study area	Ca ppm	Fe ppm	K ppm	Mg ppm	Na ppm	Si ppm	Sr ppm	Li ppb	Mn ppb	Cu ppb	Zn ppb	Ba ppb	U ppb	Al ppb
Yangynag	6.47	0.04	1.12	1.64	3.96	4.89	0.04	ND	11.13	0.44	2.69	9.95	0.01	19.50
Yangynag	6.64	0.04	1.12	1.71	4.05	5.04	0.04	ND	11.21	0.28	1.98	10.19	0.01	13.53
Yangynag	6.60	0.04	1.11	1.72	4.05	5.01	0.04	ND	10.87	0.29	1.74	10.06	0.01	12.37
Samchuk	36.70	<0.005	0.64	2.72	2.88	2.42	0.02	ND	<0.05	0.37	0.85	2.42	0.12	16.30
Samchuk	37.10	<0.005	0.65	2.72	2.91	2.46	0.02	ND	<0.05	0.47	2.68	2.18	0.11	19.02
Samchuk	36.40	<0.005	0.65	2.67	2.90	2.44	0.02	ND	<0.05	0.32	1.94	2.23	0.12	20.66
Uljin	9.22	<0.005	1.26	2.63	8.38	6.90	0.03	ND	<0.05	0.58	1.30	4.11	0.06	8.27
Uljin	8.68	<0.005	1.19	2.55	7.96	6.58	0.02	ND	<0.05	0.62	3.02	3.94	0.05	<0.2
Uljin	9.37	<0.005	1.28	2.65	8.41	7.00	0.03	ND	<0.05	0.32	1.39	3.90	0.06	<0.2

Appendix V. Microchemistry of reared water at three hatcheries in March 2003.

study area	Ca ppm	Fe ppm	K ppm	Mg ppm	Na ppm	Si ppm	Sr ppm	Li ppb	Al ppb	Mn ppb	Cu ppb	Zn ppb	Ba ppb	U ppb
Yangyang	8.12	0.014	1.14	2.03	5.54	4.90	0.065	0.03	1.27	5.00	0.69	2.65	9.01	0.04
Yangyang	8.08	0.013	1.13	2.00	5.46	4.84	0.065	0.09	1.16	5.50	0.59	2.48	9.99	0.03
Yangyang	8.14	0.014	1.12	2.04	5.54	4.90	0.065	0.09	1.15	5.43	0.57	2.48	10.1	0.03
Samchuk	32.3	0.003	0.56	2.60	2.86	2.19	0.033	n.d	1.26	0.62	0.44	3.97	2.43	0.13
Samchuk	32.4	0.003	0.56	2.63	2.88	2.22	0.033	n.d	1.19	0.50	0.29	5.16	2.21	0.12
Samchuk	32.7	0.007	0.58	2.65	2.90	2.18	0.033	n.d	1.20	0.30	0.24	2.08	2.14	0.12
Uljin	7.50	0.019	0.85	2.13	4.49	4.74	0.031	0.10	0.67	22.9	1.68	15.9	2.71	0.05
Uljin	7.48	0.031	0.86	2.17	4.50	4.71	0.031	0.11	0.59	22.7	0.35	9.19	2.54	0.05
Uljin	7.27	0.020	0.87	2.07	4.44	4.57	0.031	0.11	0.67	24.0	0.36	15.8	2.67	0.05

Appendix VI. Microchemistry of salmon fry otolith at three hatcheries in March 2002(continued).

study area	Ca %	K ppm	Na ppm	Sr ppm	B ppm	Mg ppm	Al ppm	Mn ppm	Cu ppm	Zn ppm	Rb ppm	Ba ppm	Pb ppm	Cd ppm	Ce ppm	U ppm
Yangyang	37.6	2025	10299	1138	11.46	36.20	0.78	2.89	0.75	72.23	0.62	11.40	0.58	20.63	15.08	0.52
Yangyang	37.4	2277	10366	1136	13.85	49.64	1.65	2.92	0.91	78.36	0.72	12.00	0.61	31.40	12.41	0.56
Yangyang	38.3	1304	5264	1143	3.88	31.76	0.21	2.86	0.42	65.90	0.27	10.81	0.48	9.92	4.54	0.50
Yangyang	38.7	1254	4369	1168	1.94	35.36	0.59	2.75	0.54	78.21	0.30	11.05	0.60	29.83	10.56	0.56
Yangyang	38.3	1435	4054	1174	0.97	37.21	0.59	3.10	0.53	75.26	0.34	11.43	0.96	20.27	6.08	0.55
Yangyang	38.7	1238	3483	1134	0.20	37.00	10.85	3.45	0.36	75.89	0.27	10.92	1.27	19.35	8.29	0.59
Yangyang	38.3	1592	3902	1145	0.46	39.62	1.13	3.04	0.35	65.02	0.40	10.84	0.96	16.83	6.18	0.52
Yangyang	38.2	1562	3537	1170	0.06	38.76	1.14	3.14	0.44	74.15	0.42	11.40	1.22	22.34	5.83	0.73
Samchuk	37.9	2726	11329	410	11.53	74.73	2.32	2.56	1.17	79.36	1.40	5.22	1.82	43.56	23.08	0.71
Samchuk	37.6	2269	8955	403	8.78	80.94	2.86	2.94	0.94	70.84	1.15	4.49	1.01	20.56	12.83	1.25
Samchuk	37.3	2405	9820	414	9.96	67.42	1.67	2.84	0.92	85.99	1.38	4.70	1.38	39.94	31.59	1.00
Samchuk	37.4	2290	9135	398	9.00	55.27	1.43	2.57	0.77	77.84	1.20	4.27	0.96	25.05	14.56	0.79
Samchuk	37.5	2399	9072	396	7.96	50.84	1.19	2.68	0.65	78.94	1.28	3.97	0.74	20.37	12.56	0.84
Samchuk	37.5	3107	11317	407	11.17	60.22	1.41	2.54	0.75	71.32	1.73	3.83	0.63	12.72	9.64	0.80
Samchuk	37.3	2610	11352	411	12.18	53.49	0.69	2.39	0.69	68.84	1.32	3.81	0.44	11.14	8.35	0.49

Appendix VI. Microchemistry of salmon fry otolith at three hatchery in March 2002.

study area	Ca %	K ppm	Na ppm	Sr ppm	B ppm	Mg ppm	Al ppm	Mn ppm	Cu ppm	Zn ppm	Rb ppm	Ba ppm	Pb ppm	Cd ppm	Ce ppm	U ppm
Uljin	38.9	648	3281	577	0.80	36.50	2.11	4.57	0.42	82.16	0.11	5.81	1.56	20.42	14.72	1.18
Uljin	38.2	771	3443	533	1.43	49.93	2.63	4.81	0.89	89.63	0.20	6.02	1.79	25.56	15.64	1.51
Uljin	38.8	685	3430	562	0.97	36.33	1.82	4.26	0.59	77.72	0.12	5.64	1.40	21.06	10.82	1.30
Uljin	38.3	677	3380	537	1.62	65.68	3.98	5.62	0.75	103.55	0.14	5.43	1.83	38.00	18.03	2.12
Uljin	38.4	882	4092	544	1.84	53.29	1.94	4.24	4.17	88.66	0.24	5.04	1.98	48.93	119.53	1.17
Uljin	37.5	784	3735	528	1.23	57.14	16.79	4.59	4.56	88.99	0.21	5.67	4.41	75.75	42.32	1.91
Uljin	38.7	724	3611	552	0.91	43.67	1.17	4.10	4.50	87.63	0.15	5.32	2.41	24.74	15.60	0.84
Uljin	38.5	696	3550	546	2.09	41.65	1.41	4.35	6.10	86.59	0.13	5.42	2.40	26.11	18.00	0.97
Uljin	38.4	671	3473	552	3.36	55.01	2.11	4.44	0.43	70.41	0.14	5.34	1.56	19.14	15.11	4.23
Uljin	38.1	718	3538	545	2.47	45.65	1.77	4.18	3.15	76.57	0.16	5.15	1.76	20.32	15.24	1.43
Uljin	37.6	846	3708	542	2.11	46.46	1.27	4.33	0.54	79.98	0.26	5.70	1.76	33.84	15.84	1.17
Uljin	38.6	859	3783	546	1.92	50.69	1.94	4.33	0.78	74.33	0.24	5.52	1.64	37.78	18.97	2.26
Uljin	38.8	842	3710	543	1.85	47.69	0.81	4.26	0.46	82.38	0.25	5.67	1.55	32.50	11.72	0.62