

수산특정연구과제최종보고서

과제 번호 : F10601406A220000100

하구역에서의 뱀장어 생태와 어도 개선 방안

Ecology of eels *Anguilla japonica* and design of eel ladder
in the estuaries

2009. 12.

주관연구기관 : 충 남 대 학 교

협동연구기관 : 서해수산연구소

농 립 수 산 식 품 부

제 출 문

농수산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “하구역에서의 뱀장어 생태와 어도 개선 방안” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2009 년 12 월 일

주관연구기관명 : 충남대학교

총괄연구책임자 : 이 태 원

협동연구기관명 : 국립수산과학원
서해수산연구소

협동연구책임자 : 황선도

참 여 연 구 원

역 할	성 명	소 속	직 위 비 고
총괄연구책임자 연 구 원 연구조원	이 태 원	충남대학교	교 수
	황 학 빈		박사과정
	고 영 진		학사과정
	정 상 원		
	이 승 렬		
	배 기 덕		
	이 정 훈		
	천 강 문 정 병 천		
협동과제 책임자 연 구 원 연구조원	황 선 도	서해수산연구소	연 구 사
	황 선 재	국립수산과학원	
	정 석 근	국립수산과학원	
	임 동 현	서해수산연구소	
	김 진 환	국립수산과학원	연구조원
	이 선 미	서해수산연구소	
자문위원	임 흥 수	EMTS	이 사
	김 상 희	“	부 장
	박 종 엽	제주 중문어촌계	어촌계장
	하 영 두	낙동강 비들기수산	대 표

요 약 문

I. 제 목

하구역에서의 뱀장어 생태와 어도 개선 방안

II. 연구개발의 목적 및 필요성

일본, 대만, 북미 및 유럽의 온대 뱀장어는 하구 및 하천의 우점 어종이었으나 1970년대 후반부터 자원량이 급격히 감소하여 2000년대의 뱀장어 자원은 1970년대의 10 % 이하로 추정되었다. 감소 원인은 무분별한 남획, 성장기 서식처인 하천의 수질 악화, 댐 건설로 인한 실뱀장어나 성숙 뱀장어의 이동 경로 차단, 전지구적 기후변동에 따른 산란장 및 치어 회유에 대한 영향 등으로 추정된다. 뱀장어 자원의 감소는 수산 경제뿐 아니라, 하천의 종다양성에 상당한 영향을 미치게 되어 이에 대한 대책이 요구된다. 국내 뱀장어 자원도 심각한 수준으로 감소된 것으로 추정되며, 앞으로 뱀장어 자원 관리를 위해서는 성장기 뱀장어의 기초적인 생태 자료가 절실히 요구된다.

국내 하천 하구의 뱀장어 생태에 대한 연구가 거의 수행되지 않아 먼저 본 연구에서는 성장기 뱀장어의 기본적인 생태에 대하여 자료를 수집하여 분석하면서 하구에 설치되어 있는 어도가 제 역할을 하는지에 대하여 생태 자료를 바탕으로 분석하였다. 그리고 실험실에서 모형 어도를 제작하여 하구 환경 및 실뱀장어의 행동 과 습성을 고려한 다양한 소상 조건을 재현하여 실뱀장어 소상량을 평가하였다. 이 실험 결과를 바탕으로 실뱀장어 어도를 제작하여 일부 현장 검증을 수행하였다.

III. 연구개발 내용 및 범위

1. 뱀장어의 생태

2003년부터 2009년 사이 금강, 만경강, 낙동강 및 한강 하구에서 뱀장어(*Anguilla japonica*)성어를 수집하여 외형 특징과 성별을 구분하였고, 이석의 미세구조를 분석하여 연령과 성장을 추정하였다. 금강과 만경강 하구 뱀장어는 이석의 Sr/Ca 비를 분석하여 산란 회유에 참여하는 은뱀장어의 성장기 동안의 서식처 유형에 대하여 분석하였다.

총 785마리의 뱀장어를 수집 분석하였다. 금강과 낙동강 하구에서 수집한 암컷과 수컷 뱀장어는 암컷이 주를 이루었고, 만경강 하구에서는 암수 비가 차이가 없었다. 은뱀장어의 경우에도 금강과 낙동강 하구에서는 암컷이 우점하였고, 만경강에서는 암수 비가 유의한 차

이가 없었다.

성장기 뱀장어의 연령 추정은 실뱀장어 성장 정지선(elver mark)을 육수연령(continental age)의 기준으로 하였고, 불투명대에서 투명대로 이행되는 부분에 뚜렷한 성장 정지선이 발달하여 연륜으로 판독하였다. 금강 암컷 은뱀장어의 평균 연령(\pm SD)은 6.3 ± 2.5 세, 평균 전장(\pm SD)은 65.6 ± 6.9 cm이었고, 수컷 은뱀장어는 6.3 ± 1.4 세, 51.9 ± 3.9 cm로 평균 연령은 비슷하였지만 평균 전장은 암컷이 유의하게 컸다. 만경강 암컷과 수컷 은뱀장어의 평균 연령은 각각 6.9 ± 1.5 세와 5.4 ± 0.9 세, 평균 전장은 각각 62.2 ± 8.7 cm와 52.2 ± 4.9 cm로 암컷이 수컷에 비해 유의하게 컸다.

이석 장반경(Otolith radius)과 전장(Total length)는 1차 비례하여 이석과 전장의 비례 관계를 이용한 Lea 식을 이용하여 연륜 형성시기의 전장을 계산하였다. 뱀장어는 빠르게 성장한 개체들이 먼저 산란회유를 위해 바다로 빠져나가고, 하구에 남은 개체들은 성장이 느린 개체들로 구성되어 Lee 현상이 나타났다.

Von Bertalanffy 성장식은 금강에서 암컷 $L_t=71.7(1-e^{-0.25(t+0.30)})$, 수컷 $57.4(1-e^{-0.30(t+0.29)})$ 이었고, 만경강에서 암컷 $L_t=72.4(1-e^{-0.21(t+0.30)})$, 수컷 $71.9(1-e^{-0.21(t+0.32)})$ 이었다. 금강과 만경강 뱀장어는 성장률이 빠를수록 산란회유에 참여하는 나이가 어려워지는 경향을 보였고, 성장률이 같은 경우 암컷에 비해 수컷의 산란회유 연령이 어렸다.

뱀장어의 서식처 이용을 판단하기 위해서 EPMA (Electron Probe Micro Analysis) 방법과 LA-ICPMS (Laser Ablation Inductivity Coupled Plasma Mass Spectrometry) 방법을 비교한 결과, Sr/Ca 비는 EPMA 와 LA-ICPMS 결과가 1:1 상관 관계를 보여 위 두 분석 방법 결과의 차이가 없었다. 금강과 만경강의 은뱀장어 각각 53마리를 대상으로 Sr/Ca 비를 이용하여 4가지 서식처 이용 유형(type)으로 구분하였다. 금강의 은뱀장어는 성장기에 강에서 자란 river-type이 약 32%를 차지하였고, 하구에서 자란 river-estuary 및 estuary-type이 약 68%를 차지하여 가장 많았다. 만경강의 은뱀장어는 river-type이 약 50%를 차지하여 금강의 river-type 비율보다 유의하게 높았다. River-estuary 및 estuary-type은 약 39%, 연안 가까이에서 성장한 estuary-sea type의 뱀장어가 약 11%가 포함되었다. 금강 하구둑의 건설로 뱀장어의 소상이 원활하지 못한 것으로 추정된다. 뱀장어의 성장률은 river-type의 뱀장어 보다 하구에서 성장한 river-estuary, estuary-type에서 빨랐다.

2. 실뱀장어의 소상 생태

실뱀장어용 생태 어도를 설계하기 위하여 2008년 실뱀장어 소상 시기인 3-5월에 국립수산물과학원 어군행동실험실에 실뱀장어가 소상하는 하구 및 하구둑과 어도를 재현하는 모형 어도를 제작하여 다양한 소상 조건에서 실뱀장어의 소상행동을 관찰 분석하였다. 아래 해수조에 순치한 실뱀장어를 두고 위 담수조의 담수를 아래로 흐르게 하면서 달 주기, 낮과 밤,

조석 주기, 어도 경사도와 경사면 길이, 바닥 재질, 유속, 담수의 종류 등에 따라 해수조에서 어도를 통해 담수조로 소상한 실뱀장어의 개체수를 비교하고, 실뱀장어의 소상 행동을 관찰하여 최적 소상을 위한 적정 어도 조건을 추정하였다. 실뱀장어는 냄새를 제거한 수돗물로는 소상하지 않았고, 저수지물보다 강물을 선호하여 모든 실험에서는 강물을 사용하였다. 실뱀장어 소상량은 소조기보다 대조기에 유의하게 많았고($p<0.05$), 낮보다 밤에 유의하게 많았다($p<0.05$). 실뱀장어 소상량은 조석 시간에 따른 유의한 차이가 없었으나($p<0.05$), 고조위에서 유의하게 소상량 많았다($p<0.05$). 실뱀장어는 어도 경사면 길이가 짧을수록 소상량이 많았고, 경사도는 30도 이하가 효율적이었다($p<0.05$). 유속은 0.4 cm/sec 이하로 물이 약하게 흐를 때 소상량이 많았다($p<0.05$). 어도의 바닥은 솔, 자갈 및 카펫 등과 같이 거친 재질에서 소상량이 유의하게 많았다($p<0.05$).

3. 어도 설계 및 현장 설치 보완

실험실의 실험실 어도에서의 실뱀장어 소상 행동 결과를 바탕으로 천제연 하구둑 수로에 맞게 시험 어도를 설계하였다. 어도 길이는 보의 수로에 수평으로 2800 mm와 경사면이 3000 mm였고, 폭은 900 mm 중 600 mm는 약 20도 경사면을 만들고 5 cm 간격으로 5 cm 높이의 솔을 설치하였고 나머지 부분은 계단식으로 설계하였다. 2009년 2월에 현장에 설치하였고 문제점을 보완하였다

SUMMARY

Temperate eels have been the dominant species in the rivers in the East Asia, North America and Europe. Eel abundance have been decreased since 1980s, and recent eel density was estimated less than 10 % comparing to that of 1980s. In the case of eels, which depend on freshwater and estuarine habitats for their juvenile growth phase, anthropogenic impacts (e.g. pollution, habitat loss and migration barriers, fisheries) are considerable and may well have been instrumental in prompting these declines. Loss of eel resources will represent a loss of biodiversity but will also have considerable impact on socioeconomics of rural areas. Eels in Korean waters is also considered very low in abundance. However, poorly known about eel biology in Korean waters. Basic eel biology is urgently needed to restore the eel population.

Biology and ecology of eels

The aim of this study is to clarify the basic biology and ecology of eels by analyzing the samples collected from the in the Korean estuaries, and river mouth dam effect on eel stock decrease was analyzed. To design the eel specific ladder, glass eels' behavior during upstream migration was observed in the laboratory experimental eel ladder under different environmental conditions and ladder materials. The designed experimental eel ladder was installed in an estuary and made up the weak points.

Sex ratio, age and growth and habitat uses of yellow and silver eels *Anguilla japonica* were determined using samples collected from the Geum River and Mangyeong River estuaries between 2003 and 2006. The age was determined by otolith microstructure analysis, and the Sr/Ca ratios in otoliths was analyzed under electron probe micro analysis (EPMA) and laser ablation inductivity coupled plasma mass spectrometry (LA-ICPMS) to determine the pattern of habitat use of silver eels.

A total of 392 eels were collected during the study. Female eels predominated in Geum River over 97%, while the sex ratio of in Mangyeong River eels was not significantly different from 1:1. Elver mark in otolith formed between oceanic larval stage and continental growth stage was used as the origin of continental age of eels. Annual growth stops were formed as distinct checks between opaque zone and translucent zone.

Mean age (\pm SD) and total length of silver eels in the Geum River estuary were 6.3 ± 2.5 yr and 65.6 ± 6.9 cm in females and 6.3 ± 1.4 yr, 51.9 ± 3.9 cm in males, respectively. Mean age (\pm SD) and total length of silver eels in the Mangyeong River estuary were 6.9 ± 1.5 yr and 62.2 ± 8.7 cm in females, and 5.4 ± 0.9 yr and 52.2 ± 4.9 cm in males, respectively. The mean total lengths of female eels were significantly larger than those of males in the 2 river estuaries.

As total length was linearly related to otolith radius, the lengths corresponding to each annuli were back-calculated by Lea's formula. Because maturity of eels was determined not by age but total length, i.e. the individuals in an age group that grew faster migrated to the sea for spawning early, the individuals remained in continental waters were composed of eels that grew slow in an age group, which resulted in the Lee phenomenon such as in our data. Von Bertalanffy growth equations in total length of eels in the Geum River estuary were $L_t=71.7(1-e^{-0.25(t+0.30)})$ for females and $57.4(1-e^{-0.30(t+0.29)})$ for males and those in the Mangyeong River estuary were $L_t=72.4(1-e^{-0.21(t+0.30)})$ for females and $L_t=71.9(1-e^{-0.21(t+0.32)})$ for males.

The Sr/Ca ratios in otolith obtained by analysis by EPMA and LA-ICPMS were not different. Four habitat use types could be recognized by the Sr/Ca ratios for the eels. In the Geum River estuary, river-type eels were 32% in proportion, and river-estuary and estuary-type were 68%. In the Mangyeong River, river-type eels were 50%, and river-estuary and estuary-type were 38%. Estuary-sea eels were consisted of about 11%. Significantly lower proportion of river eels in Geum River than in Mangyeong River eels suggested that the river mouth dam in Geum River might be an obstacle for upstream migration of eels to freshwater. The growth rates of the river-type eels were lowest comparing to those of the other habitat use types.

Upstream Behavior of Glass Eels

Upstream behavior of glass eels was examined in the experimental eel-ladder under the various factors affecting upstream migration of glass eels and the different conditions of eel-ladder in order to design the glass eel pass. The experimental eel-ladder was consisted of the upper fresh water reservoir and the lower sea water one, and glass eels in the sea water can move up to the upper fresh water through the slope (eel pass) between them. Since the glass eels actively moved up the slope mainly to the river water, the experiment was realized using the river water. Significantly

higher number of glass eels moved up during the spring tide than during the neap tide, and during the night than during the day. Upstream movement was significantly higher during the time of high tide than the low tide. Glass eels effectively moved up through the slope less than 30° , and water flow velocity lower than 4 cm/sec. The fish preferred the coarser slope bottom covered with small gravels, brush or carpet.

Design and installation of eel ladder

Experimental eel ladder was designed following to the result obtained in the laboratory experiment to install in a channel of Cheonjeyen estuarine dam. the ladder was composed horizontal part of 2800 mm fitting to the channel bottom, and slope part of 3000 mm fitting to the slope of the dam. It was 900 mm in width, which was divided into a flat bottom of 300 mm and a slope bottom of 600 mm. The brushes of 5 cm in height were planted on the slope bottom of the ladder with an interval of 5 cm. The experimental ladder was installed in February 2009, and modified by frequent observation.

CONTENTS

Chapter 1. Introduction	9
Chapter 2. Background	15
1. Eel ecology	15
2. Upstream migration of glass eels	16
3. Eel-ladder	17
Chapter 3. Methods and Results	19
1. Eel ecology	19
a. Materials and methods	19
b. Results	23
c. Discussion	45
2. Upstream behavior of glass eels in an experimental eel-ladder	54
a. Materials and methods	54
b. Results	56
c. Discussion	66
3. Design and field experiment of experimental eel-ladder	68
a. Movable eel-ladder (2008)	68
b. Semi-permanent eel-ladder (2008-9)	69
Chapter 4. Achievement of the initial goals and contribution to the related fields	70
1. Eel ecology	70
2. Upstream behavior of glass eels	70
3. Design and field experiment of experimental eel ladder	70
Chapter 5. Application of the obtained results to the future research	71
1. Applications	71
2. Results obtained	71
Chapter 6. Reference	75

목 차

제 1 장	연구개발과제의 개요	9
제 2 장	국내외 기술개발 현황	15
1.	뱀장어 생태 연구	15
2.	실뱀장어 소상 행동 연구	16
3.	뱀장어 어도	17
제 3 장	연구개발 수행 내용 및 결과	19
1.	뱀장어의 생태	19
가.	재료 및 방법	19
나.	연구 결과	23
다.	토의	45
2.	실험 어도에서 실뱀장어의 소상 행동	54
가.	재료 및 방법	54
나.	결과	56
다.	고찰	66
3.	시험 어도 설계 및 현장 실험	68
가.	카피트 바다 이동식 어도 실험 (2008년)	68
나.	보의 수로를 확대한 어도 설치 (2008-9년)	69
제 4 장	목표달성도 (%) 및 관련분야에의 기여도	70
1.	뱀장어의 생태 (100%)	70
2.	뱀장어의 소상행동 (100%)	70
3.	뱀장어 생태 어도 설계 (100%)	70
제 5 장	연구개발결과의 활용계획	71
1.	활용 전망	71
2.	연구 성과	71
제 6 장	참고문헌	75

제 1 장 연구개발과제의 개요

뱀장어속 어류(Genus *Anguilla*)는 하천이나 하구에서 성장하고 바다에서 알을 낳는 대표적인 강하성 어류(catadromous fish)로, 전 세계에 18종이 알려져 있다(Aoyama *et al.*, 2001; Watanabe and Aoyama, 2005). 동북 아시아산 뱀장어(*Anguilla japonica*)는 한반도를 포함한 중국, 일본 및 대만의 하천이나 하구에서 성장하며, 수산 경제적으로 중요한 어종이다.

동북아산 뱀장어는 마리아나 해산 근처에서 4월경부터 8월 그믐밤에 산란하는 것으로 알려졌고(Tsukamoto *et al.*, 2003), 일본 동경대학교 해양연구소를 중심으로 1970년대 초반부터 뱀장어 산란장 조사를 통해 최근 쓰루가 해산(Suruga Seamount) 근해에서 난황자어와 어미뱀장어가 채집되어 (Tsukamoto, 2006, Chow *et al.*, 2009), 20세가 이후 오랜 숙제였던 뱀장어 산란 생태가 밝혀졌다(Tsukamoto, 2006). 알에서 태어난 뱀장어 자어인 뱃잎뱀장어(leptocephalus)는 북적도 해류(North Equatorial Current)와 쿠로시오 해류(Kuroshio Current)를 따라 이동하여 대륙사면에 이르러 치어인 투명실뱀장어(glass eel)로 변태한다. 투명실뱀장어는 대륙붕을 회유하여 서식처인 동북아시아의 대만, 중국, 일본, 한국 등 하구에 이르며, 하구에서 검은 색소가 생기며 실뱀장어(elver)로 바뀌어 하천으로 소상하여 성장한다(Fig. 1). 성장기 미성숙한 뱀장어는 배 쪽이 노란색을 띠기 때문에 황뱀장어(yellow eel)라 하며, 성장하여 산란 회유 때가되면 배 쪽이 은백색으로 바뀌어 은뱀장어(silver eel)라 부른다. 은뱀장어들은 산란을 위해 하천이나 강에서 하구로 이동하여 적응한 후 산란장으로 회유한다(Fig. 1).

온대 뱀장어는 하구와 하천의 생태계에서 상대 밀도가 높았고 수산 경제적으로 중요하여 유럽과 북미를 비롯하여 남반구의 뉴질랜드와 오스트레일리아까지 많은 나라에서 1900년대 초부터 많은 생태 연구가 수행되었다(Bertin, 1951; Deelder, 1970; Sinha and Jones, 1975; Tesch, 2003). 동북아산 뱀장어 (*A.japonica*)는 한국을 비롯한 중국, 대만, 일본에서 수산양식에서 차지하는 비중이 크기 때문에, 양식에 관하여 많은 연구가 수행되었으며(Usui, 1974; Tabeta, 1996), 근래에 초기 생활사를 비롯한 생태에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(Aida *et al.*, 2003)

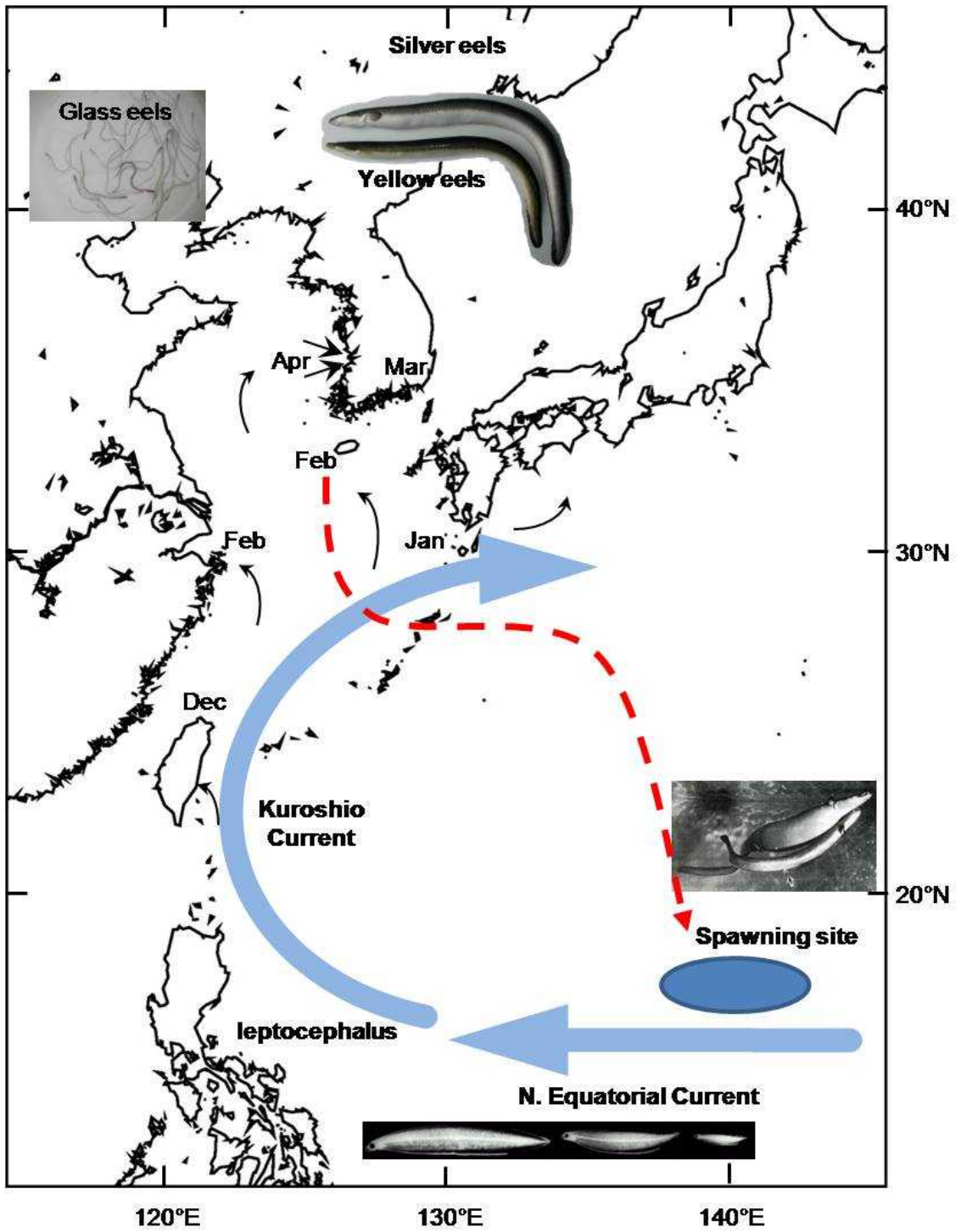


Fig. 1. Life cycle and migration route of *Anguilla japonica*.

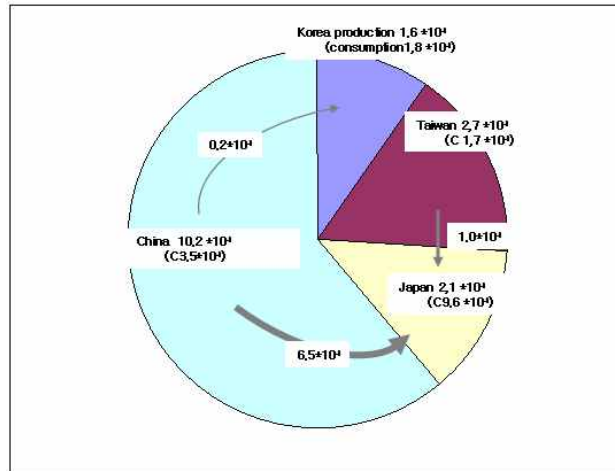


Fig. 2. Production and consumption of eels in the four East Asian countries in 2006

뱀장어 속 어류 가운데 동북 아시아산 *A. japonica*는 수산경제적으로 가장 중요한 수산 자원이며, 우리나라를 비롯한 일본, 중국 및 대만의 중요 양식어종이다. 2006년 수산통계에 의하면 4개국의 총 양식생산량은 166,000 mt로, 그 중 약 60%가 중국에서 생산되며, 중국은 생산량의 약 60%를 일본으로 수출한다. 일본은 뱀장어의 최대 소비국으로 4개국 생산량의 약 60% 정도를 소비한다. 우리나라는 약 16,000 mt가 양식 생산되며, 중국으로부터 약 2,000 mt를 수입하여 총 소비량은 18,000 mt 정도이다(Fig. 2).

동아시아 4개국에서 이러한 뱀장어 양식을 위해서는 약 200여 톤의 실뱀장어가 필요하다. 근래에 실험실에서 뱀장어를 부화시켜 성어까지 키우는데 성공하였지만(Kagawa et al., 2005), 아직 실뱀장어의 수요를 충족할 수 있는 경제적 종묘 생산 단계에는 이르지 못하여, 뱀장어 양식장에서는 하구로 소상하는 실뱀장어를 잡아 양식한다. 그러나 실뱀장어의 연간 어획량은 해에 따라 큰 차를 보여 계획적인 뱀장어 양식이 어려운 실정이다.

우리나라의 실뱀장어 어획량은 약 7 톤 내외이며, 수요량이 15톤 정도로 연간 약 6톤 내외를 수입한다. 실뱀장어 어획량은 해에 따른 어획량 변동이 심하여 2005년에는 3.5톤, 2008년에는 2.1톤 밖에 어획되지 않았고(Fig. 3), 이들 해에는 동아시아 모두에서 실뱀장어 어획량이 적어 뱀장어 양식에 차질이 있었다. 이와 같은 실뱀장어 어획량의 변동은 아래에 다룰 여러 가지 원인이 복합 작용 때문이다.

일본, 대만, 북미 및 유럽의 온대 뱀장어는 하구 및 하천의 우점 어종이었으나 1970년대 후반부터 자원량이 급격히 감소하여 2000년대의 뱀장어 자원은 1970년대의 10% 이하로 추정되었다 (Fig. 4, Bonhommeau et al., 2008; Dekker, 2003a; Dekker, 2003 b). 감소 원인은 무분별한 남획, 성장기 서식처인 하천의 수질 악화, 댐 건설로 인한 실뱀장어나 성숙 뱀장어의 이동 경로 차단, 전지구적 기후변동에 따른 산란장 및 치어 회유에 대한 영향 등으로 추

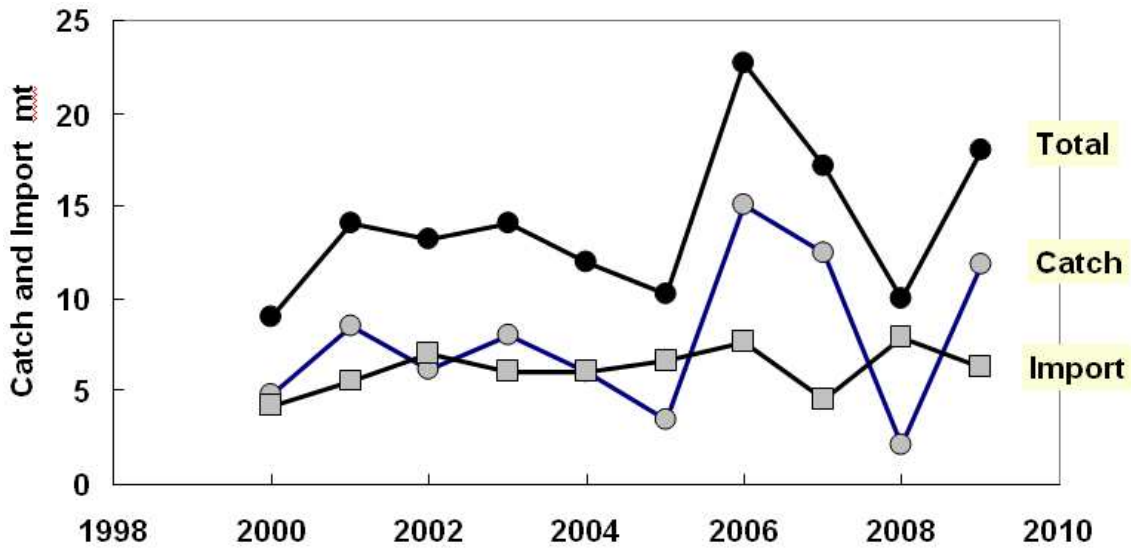


Fig. 3. Annual catch and import of glass eels in Korea

정된다. 뱀장어 자원의 감소는 수산 경제뿐 아니라, 하천의 종다양성에 상당한 영향을 미치게 되어 이에 대한 대책이 요구된다. 국내 뱀장어 자원도 심각한 수준으로 감소된 것으로 추정되며, 앞으로 뱀장어 자원 관리를 위해서는 성장기 뱀장어의 기초적인 생태 자료가 절실히 요구된다.

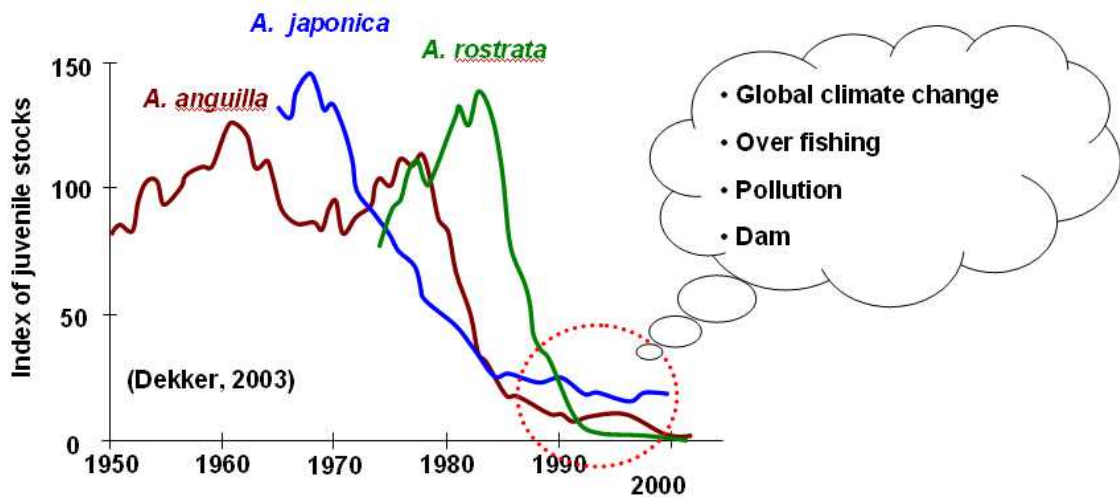


Fig 4. Relative variation in abundance of 3 temperate eels during the last 50 years

우리나라에서도 뱀장어는 수산 경제적으로 중요한 양식어종으로 양식과 관련된 먹이 질병 등에 관한 연구가 활발히 수행되었다(김과 조, 1974; 김 등 1977; 배 등, 2008; 김 등, 2008). 뱀장어는 국내 하구 및 하천 생태계에서 중요한 위치를 차지하였으나 생태연구는 실뱀장어를 대상으로 일부 수행되었을 뿐 (Kim, 1974; Lee and Lee, 1989; Moon, 2002), 성장기나 산란회유기 뱀장어 생태에 대한 연구는 미비한 상태이다.

위에서 살펴본 것과 같이 뱀장어는 우리나라 수산 경제적으로 중요한 어종이기 때문에 양식 및 실뱀장어 소상생태에 관하여는 연구가 되었으나 성장기 뱀장어의 생태에 대하여는 거의 연구되지 못하였다. 국내 뱀장어의 자원 상태에 대한 연구는 수행되지 못하였지만 대부분의 하구에서 자원량 감소로 뱀장어 어업은 중단된 상태로, 우리나라 뱀장어 자원도 심각한 상태로 판단된다. 과거 뱀장어는 하천과 하구에서 자원량이 많아 중요한 위치를 차지하였으나, 앞에서 살펴본 것과 같이 남획, 서식처인 하천 및 하구의 오염, 하구둑의 건설로 인한 이동 통로의 차단 및 전지구적 기후변동으로 인한 회유 영향 등으로 자원량이 크게 감소한 것으로 보인다.

뱀장어 서식처의 종다양성 보전 및 자원 회복을 위해서는 위에 열거한 감소 원인을 분석하여 해결하여야 할 것이다. 그러나 전지구적 기후변동이나 서식처인 하천 하구의 수질 개선 등은 범세계적 혹은 국가 차원에서 노력 중이며 앞으로 상당한 시간이 요구되는 과제이다. 감소 원인 가운데 하구둑이나 하천의 보에 의한 뱀장어 소상 회유로의 차단 문제는 노력만 하면 어느 정도 해결이 가능한 과제이다. 본 연구에서는 이를 위하여 하구둑이 뱀장어 소상에 미치는 영향을 평가하고 하구에서 뱀장어의 소상량을 늘릴 수 있는 뱀장어 어도에 관하여 연구하였다.

국내 하천 하구의 뱀장어 생태에 대한 연구가 거의 수행되지 않아 먼저 본 연구에서는 성장기 뱀장어의 기본적인 생태에 대하여 자료를 수집하여 분석하면서 하구에 설치되어 있는 어도가 제 역할을 하는지에 대하여 생태 자료를 바탕으로 분석하였다. 그리고 실험실에서 모형 어도를 제작하여 하구 환경 및 실뱀장어의 행동 과 습성을 고려한 다양한 소상 조건을 재현하여 실뱀장어 소상량을 평가하였다. 이 실험 결과를 바탕으로 실뱀장어 어도를 제작하여 일부 현장 검증을 수행하였다.

연도별 연구 목적과 연구 내용을 요약하면 다음과 같다.

구 분	목 표	수행 내용
1차 년도 (2006- 2007년)	주요 왕복성 어류의 생태 뱀장어 소상 실험 어도 설계	- 실뱀장어 소상에 미치는 영향 조사 - 뱀장어와 은어의 생태 연구 (하구 뱀장어 채집 및 분석 방법 정립) - 실뱀장어 어도 설계 1차 실험 및 보완
2차 년도 (2007- 2008년)	뱀장어 서식처 이동 실험어도에서 실뱀장어의 소상 행동	- LAICPMS를 이용한 이석 원소 분석을 통한 뱀장어의 서식처 이동 분석 - 실험 어도의 다양한 조건에서 실뱀장어 소상 행동 분석
3차 년도 (2008- 2009년)	뱀장어의 생태 어도 모형 실험 및 뱀장어 어도 개선 방안	- 하구 뱀장어의 성비, 나이와 체장 조성 및 성장 추정 - 성장기 동안 뱀장어의 서식처 이동 - 산란 회유 뱀장어의 성비, 나이와 체장 조성 및 성장 추정 - 뱀장어 어도 모형 실험과 뱀장어 어도 설계

* 최초 계획서에서의 연구 제목은

‘왕복성어류의 종다양성 현황 평가 및 보전 대책 수립’이었으나,

1차년도 연차실적계획서 평가 후

‘하구역에서의 뱀장어 생태와 어도 개선 방안’으로 변경되어,

연구 목표가 하구에서의 뱀장어의 생태와 어도 개선 방향으로 변경되어 2차년도부터
뱀장어 이외의 왕복성 어류에 대한 생태 연구는 제외되었음

제 2 장 국내외 기술개발 현황

1. 뱀장어 생태 연구

뱀장어는 성장기 초기에 암수가 구분되지 않고 크기가 약 30 cm 정도 이르러 생식소 차이로 암수가 구분되며, 연구지역에 따라 암수 비가 일정하지 않아 암수 결정에 여러가지 가설이 제안되었다. 북미산의 경우에 서식 하천의 상류 쪽에 암컷이 더 많이 분포하고 하구로 갈수록 수컷의 비가 높았으나(Helfman *et al.*, 1987) 이와는 반대로 동북아시아산 뱀장어의 이석 미량원소 분석을 통해 암컷이 해수 환경에서 우점하고 수컷이 담수에서 우점하는 연구결과가 있어(Han and Tzeng, 2007) 암수에 따른 서식처 결정은 일반화하기는 힘들다. 북미산과 유럽산의 뱀장어의 경우 실뱀장어 때의 크기에 따라 암수를 결정된다고 제안하였으나(Vladykov, 1966; Bellini, 1970; Kuhlman, 1975). 성숙한 암수 뱀장어의 이석 성장 분석을 통해 역추산한 실뱀장어기의 길이가 유의한 차이가 없어 하구에 도달한 실뱀장어의 크기도 암수 결정요인으로 보기 어렵다(Tzeng *et al.*, 2000a). 또한 서식밀도에 따라 서식 밀도가 높으면 수컷의 비가 높았고(De Leo and Gatto, 1996; Krueger and Oliveira, 1999; Walsh *et al.*, 2004), 서식밀도가 높은 양식산 뱀장어는 대부분 수컷들임이 밝혀져(Egusa and Hirose, 1973; Matsui, 1974; Tabeta, 1996), 서식밀도도 암수 결정의 요인으로 제안되었다. 이와 같이 뱀장어의 암수는 서식 환경 조건이나 생물학적 요인에 따라 달라져 일반화하기는 어렵다.

온대 뱀장어는 대부분의 하천과 하구에서 우점종이었기 때문에 성장에 관하여 많은 연구가 수행되었다(Tsech, 2003). 유럽산 뱀장어 (*Anguilla anguilla*)과 북미산 뱀장어(*Anguilla rostrata*)도 수컷보다 암컷이 더 빠르게 성장한다(Helfman *et al.*, 1987; Poole and Reynolds, 1996). 동북아산 뱀장어의 성장에 관한 연구는 유럽산과 북미산 뱀장어 연구에 비해 뒤늦게 성별 구분없이 황뱀장어의 성장에 관한 연구가 시작되었다(Guan *et al.*, 1994). 그러나 성분화가 일어나기 전에는 암컷보다 수컷이 더 빠르게 성장 한다는 연구도 보고되어(Holmgren and Mosegaard, 1996) 생활사에 따라서 뱀장어의 성장률은 변하는 것으로 알려졌다. 뱀장어의 성숙은 연령보다는 크기에 결정되며, 바다로 회유하는 온뱀장어는 수컷에 비해 암컷의 평균 연령과 체장이 크다는 사실이 밝혀졌다(Tzeng *et al.*, 2000a). 그러나, 국내 자연산 뱀장어의 연령 조성이나 성장에 관하여는 연구되지 못하였다(Krueger and Oliveira, 1999).

뱀장어가 민물에서 자라고 바다에서 산란한다고 일반적으로 인식되어왔던 것과는 달리 뱀장어의 생활사가 훨씬 복잡하다는 사실이 밝혀졌다. 이석은 어류의 나이 추정에 널리 이용되며, 이석이 민물에서 자란 시기에 형성된 부분에서는 Sr/Ca비가 낮고 바다에서 자란 시

기에 생성된 부분에는 그 비가 높기 때문에, 근래에 EPMA나 LA-ICPMS를 이용하여 이석의 핵으로부터 가장자리까지 Sr/Ca비를 분석하면 각 개체의 성장기 동안 담수와 해수 사이 서식처 이동을 파악할 수 있어 널리 이용된다. 유럽산 뱀장어의 경우 모든 뱀장어가 담수에서 성장을 하지 않고 성숙할 때까지 연안 환경에서 성장하기도 하고(Tsukamoto *et al.*, 1998; Tzeng *et al.*, 2000b; Tsukamoto and Arai, 2001), 북미산 뱀장어도 황뱀장어 시기에 불규칙적으로 담수와 하구를 오가는 사실을 밝혀졌다(Jessop *et al.*, 2002). 동북아산 뱀장어도 일부는 하천의 담수로 이동하지 않고, 연안에서 성장하는 습성이 보고되었다(Tsukamoto *et al.*, 1998; Tsukamoto and Arai, 2001). 산란 회유하는 은뱀장어 이석에는 각 개체의 성장기 정보가 기록되기 때문에 이석으로 연령을 파악하고, Sr/Ca비를 분석함으로써 성장기 동안의 서식처 이동을 추정할 수 있다. 뱀장어의 성장이나 서식처 이동은 각 개체마다 다를 수 있기 때문에 각 개체의 서식처 이동에 대한 자료는 생태 연구뿐 아니라, 뱀장어 자원의 효율적인 관리에 중요한 정보를 제공할 수 있다.

2. 실뱀장어 소상 행동 연구

뱀장어는 부화 및 실험실 치어는 생산되지만 아직 종묘생산이 되지 않기 때문에(cf. Yamamoto K. and K. Yamauchi. 1974; Yamauchi *et al.*, 1976; Tanaka, 1999, 2001) 양식장에서는 하구에서 실뱀장어를 잡아 양식한다. 이러한 수산경제적 중요성 때문에 하구에서의 실뱀장어의 생태에 대하여 많은 연구가 수행되었고, 자원 보전을 포함한 전반적인 종합 연구가 수행되었다(ref. Deelder, 1970; Tesch, 1977; Aida and Tsukamoto, 1999; Liao, 2001; Aida *et al.* 2001). 실뱀장어는 대만 및 일본 남부 도서에는 12월부터(Tzeng, 1985; Tsukamoto, 1990; Cheng and Tzeng, 1996), 제주도 및 양쯔강 하구는 1월부터 남해안에는 2월부터, 서해 연안에는 2월 하순부터 소상하여 주로 약 3달간 소상한다(김, 1974; 전 등, 1971, 문 2002).

연구자는 '실뱀장어 자원 예측을 위한 뱀장어 초기 생활사와 소상 생태 연구'(해양수산개발원 2000-2004) 연구에 참여하여 금강 실뱀장어 소상생태 연구를 담당하였다. 이 과정에서 실뱀장어 일일 어획량에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 실뱀장어 어획 시기는 수온 5~16 °C인 2월 말에서 5월 중순까지로, 일일 어획량은 조차와 월령에 비례하며, 수온, 염분 및 풍속의 변화가 어획량 일변동에 일부 영향을 주었다. 이 연구 과정에서는 어도로의 소상에 대하여는 고려하지 않았으나, 이 소상 생태 자료를 이용하여 어도 수문을 조절하면 실뱀장어 소상을 도울 수 있을 것으로 판단된다.

앞에서 서술한 것과 같이 구미에서는 별개의 뱀장어 어도를 설치하여 뱀장어 자원 증대

노력을 기울이고 있으나 아직 국내에서는 생태 어도에 대한 연구는 거의 수행되지 못하였다. 본 연구에서 실험 어도를 제작하여 다양한 소상 조건에서 뱀장어의 소상 행동을 관찰함으로써 뱀장어 어도 제작의 기본 자료를 수집하였다.

3. 뱀장어 어도

국외에서 어도는 연어를 대상으로 시작되어 유영력이 뛰어난 어류를 대상으로 설치되었고, 국내 하천의 어도도 외국의 사례를 참고하여 유영력이 강한 어류를 대상으로 대부분 설계 설치되었다. 금강 하구둑의 어도를 보면, 3부분으로 나누어 한 쪽은 계단식으로 각 계단마다 쉬어갈 수 있도록 하였고, 다른 한 쪽은 자갈을 깔아 유영력이 약한 어류들이 오르도록 설계하였다(Fig. 5). 그러나 서남 연안 하구는 조차가 커서 내외수면 차이가 크고, 어도를 이용할 수 있는 어류가 유영력이 약한 유어들로 특수한 설계가 필요하나 이러한 어류의 생태가 고려되지 못하였다.

작은 하천에서는 천제연 하구와 같이 보를 설치하고 몇 개의 수로로 민물이 바다로 흐르며 경사를 완만하게 하거나 계단식 어도가 설치되어 있다(Fig. 6). 그러나 이러한 계단식 혹은 경사식 어도들이 관리가 제대로 되지 않아 어도의 기능을 발휘하지 못하고 계단식 어도는 유영력이 약한 어류들은 소상할 수 없는 경우가 많다.

국내에서 강이나 하천에서 흐름을 차단하여 수서동물들 이동이 방해될 때 어도 설치를 하도록 되어 있으나, 어도를 이용할 생물의 생태를 고려하지 않고 설치한 경우가 대부분이고, 어도 설치 후 관리를 하지 않아 어도가 제 기능을 하지 못하는 경우가 많다. 또 대부분이 계단식이거나 물의 흐름이 강하여 유영력이 약한 어류들에게는 소상이 어렵게 되어 있다.

유럽, 북미 등에서는 1970년대부터 유영력이 약한 뱀장어와 같은 종을 대상으로 생태를 고려한 어도를 시설하고 그 효과에 대한 연구가 수행되고 있다(Leault et al. 1990; Liew, 1982). 프랑스의 한 하구둑에는 유영력이 큰 어류용 어도 이외에 유영력이 약한 뱀장어 어도를 별도로 설치한 후 시간이 지남에 따라 생물량이 증가하는 경향을 분석하였다(Fontenelle et al. 2001). 일본과 캐나다에서도 오래전부터 뱀장어 어도를 별도로 설치하여 그 효과에 대한 평가를 하고 있는 것으로 알려져 있다.



Fig. 5. Fish ladder in the Geum River dam



Fig. 6. Channels in the Cheonjeyen River dam

위에서 서술한 것과 같이 어류의 이동을 원활히 하기 위해서 어도를 설치하고 있으며 프랑스, 캐나다, 미국 및 호주 등지에서는 어종에 맞는 생태 어도를 시설하여 가고 있다. 특히 뱀장어의 경우 크기가 크고 유영력이 큰 어류에 비하여 이동력이 약하기 때문에 유영력이 큰 어류를 위한 어도 이외에 별도의 뱀장어 어도를 설치하는 노력을 기울이고 있다. 프랑스의 Vilaine River estuary에서는 Fig 7과 같이 일반 어도 옆에 뱀장어 어도를 추가로 시공하여 그 효과를 장기간 monitoring하였다(Fontenelle et al. 2001).

본 연구에서 실험실에서 다양한 조건하에서 어도에서의 뱀장어 행동을 분석하여 이에 맞는 어도를 설계하여 현장에 적용한다면 뱀장어 자원 회복에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.



Fig. 7. Fish ladders in Vilaine River estuary in France (from Fontenelle et al. 2001)

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

1. 뱀장어의 생태

가. 재료 및 방법

1) 자료수집 및 측정

본 연구에서는 강 하구의 어부에게 의뢰하여 뱀장어 회유시기인 9월에서 11월 사이 어획된 뱀장어를 수집하였다. 금강과 만경강에서는 본 연구 이전 수집된 표본으로 본 연구에서 분석하였다. 특히 이 두 하구의 표본은 이석의 Sr/Ca 비를 구체적으로 분석하였다. 섬진강에서는 2008년 자료를 수집하였으나 수집상의 문제로 대형 뱀장어만 채집되어 연령 분석에만 이용하였다. 한강 뱀장어는 2009년 11월 수집되어 일부 표본의 암수와 연령을 추정하였고 현재 성장 이석 미량원소 등에 대하여는 분석 중이다.

뱀장어는 실험실로 운반하였고, 얼음냉장 및 MS-222를 이용하여 마취하였다. 마취된 뱀장어는 전장(Total length; TL)을 1 mm 단위, 등지느러미기점거리(Predorsal fin length; PDL), 뒷지느러미 기점 거리(Preanal fin length; PAL), 머리길이(Head length; HL), 가슴지느러미 길이 (Pectoral fin length; PL)를 0.1 mm 단위까지 측정하였다. 체중(Body weight)은 1 g단위, 생식소 무게(Gonad weight; GW), 소화관 무게(gut weight; DW), 간 무게(Liver weight; LW)는 0.1 g 단위까지 측정하였다. 단, 2003년에는 전장과 체중만 계측하였다.

Table 1-1. Number of specimens collected in the estuaries

연도	금강	만경강	낙동강	섬진강	한강	Total
2003	61	26	-	-	-	87
2004	32	39	-	-	-	71
2005	103	71	-	-	-	174
2006	60	-	-	-	-	60
2007	-	-	40	-	-	40
2008	-	-	239	29	-	268
2009	-	-	-	-	85	85
Total	256	136	279	29	85	785

뱀장어는 성숙단계에 따라 황뱀장어(yellow eel)와 은뱀장어(silver eel)로 구분하였다. 황뱀장어는 몸의 등과 배의 경계 부분에 황색 띠가 머리부터 꼬리까지 이어지고 몸 전체적으로 약한 노란 바탕색을 띄며 등쪽은 검은 편이고 배쪽은 흰색이고, 가슴지느러미가 상대적으로 작은 편이고 눈도 작은 편이다(Fig. 1-1). 뱀장어가 자라 산란 회유를 떠날 때가 되면 생식소가 커지고 구아닌(guanine) 색소가 배쪽에 침적되어 몸의 체측에서 관찰되던 황색 띠는 사라지고 등 부분은 검은색이 짙어지고, 배부분은 광택을 띄는 은색에서 검정색으로 변한다(Fig. 1-1).

뱀장어는 외형 관찰로 암수를 구분할 수 없기 때문에 생식소를 관찰하여(Kuhlmann, 1975) 암수를 결정하였다. 암컷의 생식소는 몸에 부착된 기저부분에서 넓게 확장되는 형태로 생식소가 발달하고, 초기 성숙단계의 생식소는 크기가 작고 투명한 상태에서 혈관이 분포되어 있는 것이 관찰되며 성숙이 진행될수록 생식소는 흰색에 가깝게 불투명하게 변하고 생식소의 너비와 두께가 증가하고 항문을 지나 몸의 뒷부분까지 생식소가 길게 발달하였다(Fig. 1-2). 수컷 생식소는 생식소 기저부분에서 넓게 확장되지 않고, 작은 돌기모양이 고리를 형성하였다(Fig. 1-2). 정소의 발달이 미약한 수컷의 생식소는 투명하고 돌기모양이 발달하지 않지만 암컷과 같이 생식소가 넓게 확장되지 않아 암수 구별이 가능하였다. 생식소가 발달하지 않아 암수를 구분할 수 없는 개체는 이후 분석에서 제외하였다.

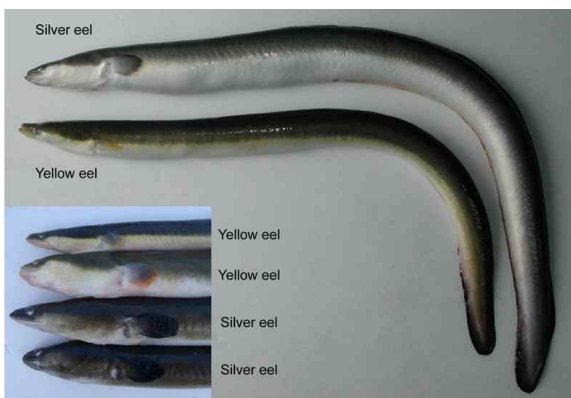


Fig. 1-1. Morphology of yellow eel and silver eel

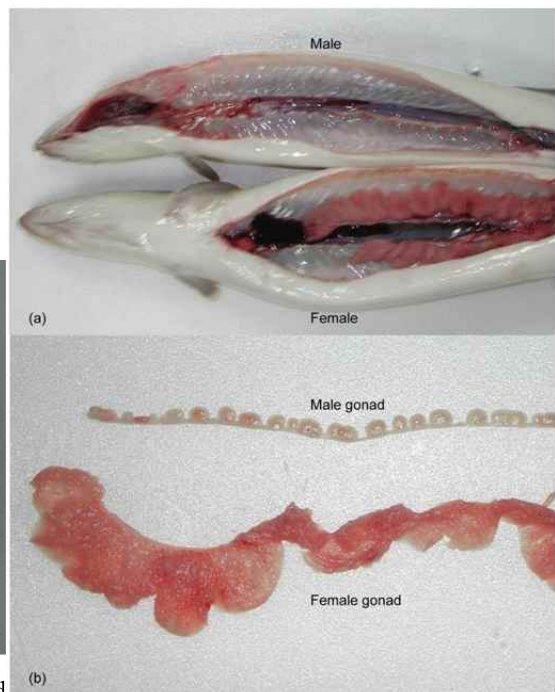


Fig. 1-2. Gonads of male and female eels

2) 나이와 성장 추정

뱀장어의 외형 특징과 생식소를 관찰 후에 이석을 추출하였다. 추출한 이석은 현미경 관찰 및 미량원소분석 실험을 위해 취급이 용이하게 이석을 slide glass에 놓고, 유리관을 세운 후 폴리에스터 수지(Buehler, Castolite Resin)로 고정한 후 연마하였다(Lee and Byun, 1996). 이석을 400, 800, 1200번 사포를 이용하여 핵과 성장선을 비교적 쉽게 관찰할 수 있는 시상면(sagittal plane) 방향으로 핵이 노출될 때까지 연마하고 연마면은 1 μ m alumina powder를 이용하여 광택을 냈다. 이석의 연령판독은 광학현미경(Olympus BH-2)의 투사광과 반사광을 이용하였다. 성장기 뱀장어에는 부화 후 실뱀장어 때까지 바다에서 형성된 부분이 실뱀장어 정지선(elver mark)으로 구분되기 때문에 이 성장 정지선을 육수 연령(continent age)의 기준(t=0)으로 하였다. 실뱀장어 정지선 이후에 육수에서 형성된 이석에는 투명대(translucent zone)와 불투명대(opaque zone)가 교차하였다. 실뱀장어 성장정지선 외부에는 투명대가 형성되며, 첫번째 불투명대가 형성되었다. 이 첫번째 투명대는 실뱀장어가 먹이를 먹기 시작하며 첫 해의 봄부터 여름까지 빠르게 성장하는 시기에 형성된 것으로 추정되며, 그 후에 다시 나타나는 불투명대는 성장이 둔화되는 가을부터 다음해 수온이 상승하는 봄까지 형성된 것으로 추정하였다. 이 첫번째 불투명대에서 투명대로 이행되는 부분에 성장 정지선이 관찰되어 이 부분을 연륜으로 판독하였다. 이석의 장반경은 이석의 중심부에 있는 핵으로부터 이석 후단부의장축 방향으로 측정하였고(OR; Otolith Radius), 실뱀장어로 변태하여 대륙붕으로 가입된 continental age의 기준이 되는 elver mark (growth check)의 길이(r_0)와 각각의 연륜까지의 길이(r_i)를 mm단위로 측정하였다.

각 개체의 전장(L_i)과 이석 장반경(R)으로부터 각 연륜이 형성되었을 때의 체장(r_i)을 Lea's 식을 이용하여 역추산(back-calculation)하였다.

$$L_i = L * r_i/R$$

역추산한 연령별(t) 전장(L_t)을 이용하여 금강, 만경강 암수 뱀장어의 성장은 von Bertalanffy 성장식(Von Bertalanffy, 1938)으로 나타내었으며, 비선형회귀분석법을 이용하여 계수를 추정하였다.

$$L_t = L_{\infty}[1 - e^{-K(t-t_0)}]$$

또, 전장(TL)-체중(BW)의 관계식($W = aL^b$, a,b는 상수)을 구하고, 구하여진 von Bertalanffy 식을 대입하여 연령에 따른 체중(W_t)의 성장식을 구하였다.

$$W_t = W_{\infty}[1 - e^{-K(t-t_0)}]^b$$

3) 이석의 미량원소 분석

전자현미분석(EPMA; Electron Probe Micro Analysis) 방법으로 이석의 미량원소 분석을 실시하기 위하여 이석의 연마면을 탄소 코팅하였다. 이석의 핵부분부터 장축방향의 가장자리까지 Strontium (Sr)과 Calcium (Ca) 농도 (% dry weight) 측정은 기초과학연구원의 CAMECA SX-51 장비를 사용하였다. 분석조건은 가속전압 15 kV, 전류 10 nA였으며, 2 μm 지름의 빔을 핵부터 10 μm 간격으로 조사하여, Sr는 30초, Ca는 20초간 분석을 실시하였다. 표준시료는 $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3$ (apatite)와 SrCO_3 (strontianite)을 사용했다.

레이저 삭막 유도결합 플라즈마 질량분석(Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry; LA-ICPMS) 방법으로 핵부터 이석의 가장자리까지 연속적으로 레이저 빔을 조사하여 ^{43}Ca 와 ^{88}Sr 의 동위원소를 측정하여 금속 농도를 분석하였다. 측정에 이용한 레이저 삭막부(laser ablation system)는 CETAC LSX-500모델이었고, 유도결합 플라즈마 질량분석부(ICPMS system)는 Perkin Elmer Elan 6000모델이었다. ICPMS의 보정을 위해서 National Institute of Standards and Technology의 표준시료 NIST 611 (500 ppm, glass water)를 사용하였다. 이 연구에서는 레이저 빔 크기를 25 μm , pulse replicate rate를 10 Hz, 레이저 에너지 Level은 100%, 레이저 빔의 이동속도 (scan rate)는 10 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 로 설정하였다. 배경값(background level)과 표준값(standard)은 시료군을 시료실(chamber)에 교체할 때 그 전후로 매번 측정하였고 1회 교체시 측정 시료는 최대 3개로 제한하였다. 측정된 결과는 아래 식을 통해 정량화하였다.

$$\left[\frac{X}{Ca}\right]_{\text{sample}} = \frac{\left(\frac{X}{Ca}\right)_{\text{sample}}}{\left(\frac{X}{Ca}\right)_{\text{standard}}} \times \left[\frac{X}{Ca}\right]_{\text{standard}}$$

여기서, μ

X : 각 동위원소 μ

$\left(\frac{X}{Ca}\right)_{\text{sample}}$: 측정시료의 각 금속과 Ca 동위원소의 CPS (count per second) 비율

$\left[\frac{X}{Ca}\right]_{\text{sample}}$: 측정시료의 각 금속과 Ca 의 농도 비율 μ

$\left(\frac{X}{Ca}\right)_{\text{standard}}$: 표준시료의 각 동위원소와 Ca 의 CPS 비율 μ

$\left[\frac{X}{Ca}\right]_{\text{standard}}$: 표준시료의 각 금속과 Ca 의 농도 μ

본 연구에서는 Sr/Ca 비만을 이용하였고, 먼저 같은 이석시료를 이용하여 EPMA와 LA-ICPMS로 분석한 Sr/Ca비를 비교하였다. 결과에 서술한 것과 같이 EPMA와 LA-ICPMS를 이용한 Sr/Ca 값은 유의한 차이가 없었기 때문에 분석기기를 고려하지 않고 해석하였다.

이석의 Sr/Ca 비는 각 개체의 서식환경, 주로 염분에 비례하기 때문에(Otake et al., 1994) Tsukamoto and Arai(2001)에 따라 river type ($\text{Sr/Ca ratio} < 2.5 \times 10^{-3}$), estuary type ($2.5 \times 10^{-3} < \text{Sr/Ca ratio} < 6.0 \times 10^{-3}$), sea type ($\text{Sr/Ca ratio} > 6.0 \times 10^{-3}$)으로 먼저 구분하였다. 구분된 각 서식처 type은 elver mark외곽의 평균 Sr/Ca ratio와 평균 ratio 변동특성에 따라 서식처 이동을 고려하여 estuary type은 estuary type과 river-estuary type으로 구분하였고, sea type은 estuary-sea type으로 명칭을 변경하였다.

나. 연구 결과

1) 전장 조성

가. 금강 하구

2003년부터 2006년까지 금강하구에서 총 256마리의 뱀장어가 수집되었다. 2003년에 총 61마리가 채집되었고 모두 암컷이었다(Table 1-2). 전장범위는 38.5~76.9 cm (56.4 ± 9.6 cm)이었다(Fig. 1-3). 2004년에는 2회 수집으로 총 32마리를 수집하였고 암컷은 30마리로 전장범위는 49.1~85.7 cm (66.0 ± 7.8 cm)이었다. 수컷은 2마리가 채집되었고 전장은 50.7와 58.5 cm이었다(Fig. 1-3). 2005년에는 총 103마리가 수집되었는데, 이 중에서 생식소로 암수 구분이 되지 않는 2마리는 분석에서 제외하여 총101마리를 분석하였다. 암컷은 모두 98마리, 전장범위는 42.0~75.8 cm (56.1 ± 8.1 cm)이었고, 수컷은 3마리로 전장범위 48.7~52.2 cm (50.3 ± 1.8 cm)이었다(Fig. 1-3). 2006년에는 총 60마리가 수집되었고 암컷은 모두 59마리로 전장범위는 43.2~78.0 cm(61.2 ± 8.6 cm) 이었고, 수컷은 1마리가 수집되었다(Table 1-2).

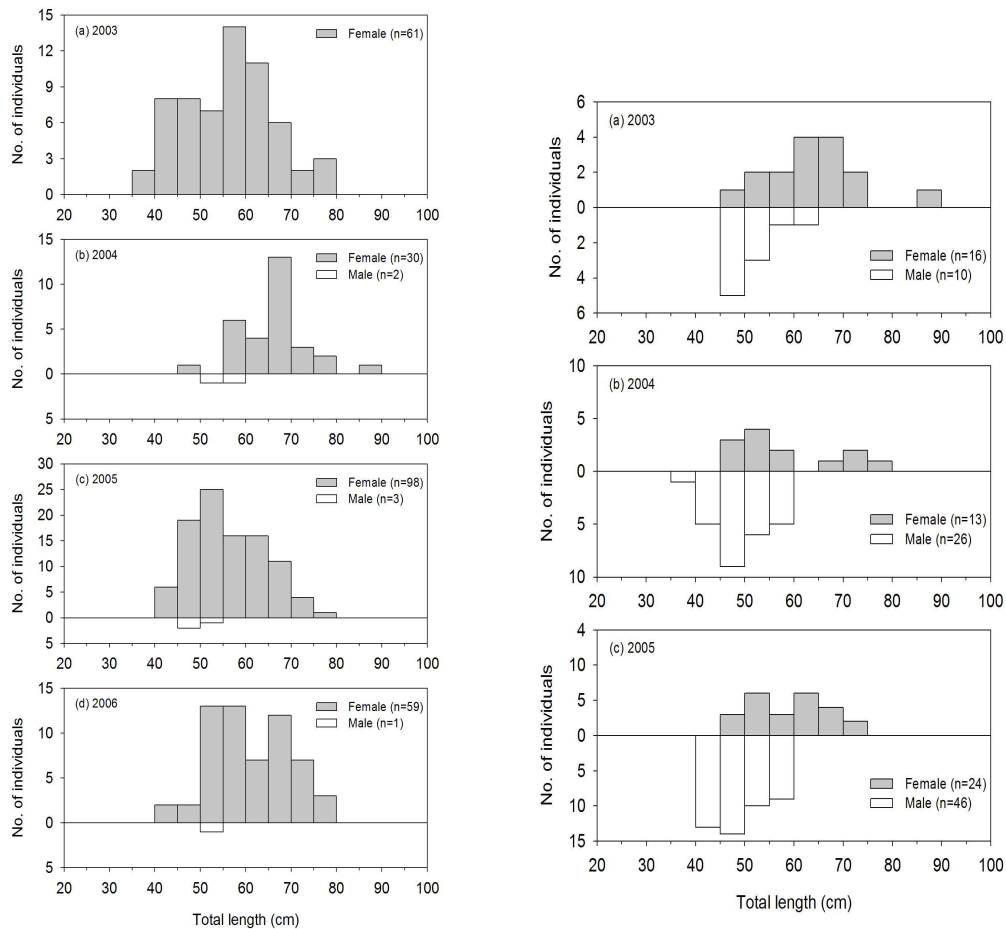


Fig. 1-3. Total length and sex composition of eels collected in the Geum River (left) and Mangyeong River estuaries (right) between 2003 and 2006

나. 만경강 하구

2003년부터 2005년까지 만경강 하구에서 총 136마리의 뱀장어가 수집되었다(Table 1-2). 2003년에 수집한 26마리 중, 암컷은 16마리로 전장범위는 46.8~87.5 cm (63.5 ± 9.5 cm)였고, 수컷은 10마리, 전장범위는 46.7~62.3 cm (51.6 ± 5.2 cm) 이었다(Fig. 1-3). 2004년에 수집한 39마리 중, 암컷은 13마리, 전장범위는 45.8~75.3 cm (57.8 ± 10.7 cm)였고, 수컷은 26마리, 전장범위는 37.5~60.0 cm (49.1 ± 5.4)이었다(Fig. 1-3). 2005년에 수집한 71마리 중, 암컷은 24마리, 전장범위는 45.4~74.8 cm (59.0 ± 7.6 cm)이었고, 수컷은 46마리, 전장범위는 42.0~59.0 cm (49.0 ± 5.1 cm)이었다. 생식소가 발달하지 않은 전장 29.8 cm의 뱀장어는 암수를 구별할 수 없었고, 이후 분석에서는 제외하였다. 3년간 수집한 암컷 뱀장어의 평균전장은 60.1 ± 9.2 cm ($n=53$)로 49.3 ± 5.19 cm ($n=82$)인 수컷에 비해 전장이 약 10 cm 컸다(t -test, $p < 0.001$).

다. 낙동강과 한강 하구

낙동강 하구에서 수집된 암컷의 평균 체장은 2007년에 50.8 ± 11.8 cm, 2008년에 59.4 ± 8.3 cm이었고, 수컷은 2007년에 56.7 ± 7.5 cm, 2009년에 57.3 ± 5.2 cm 이었다(Fig. 1-4).

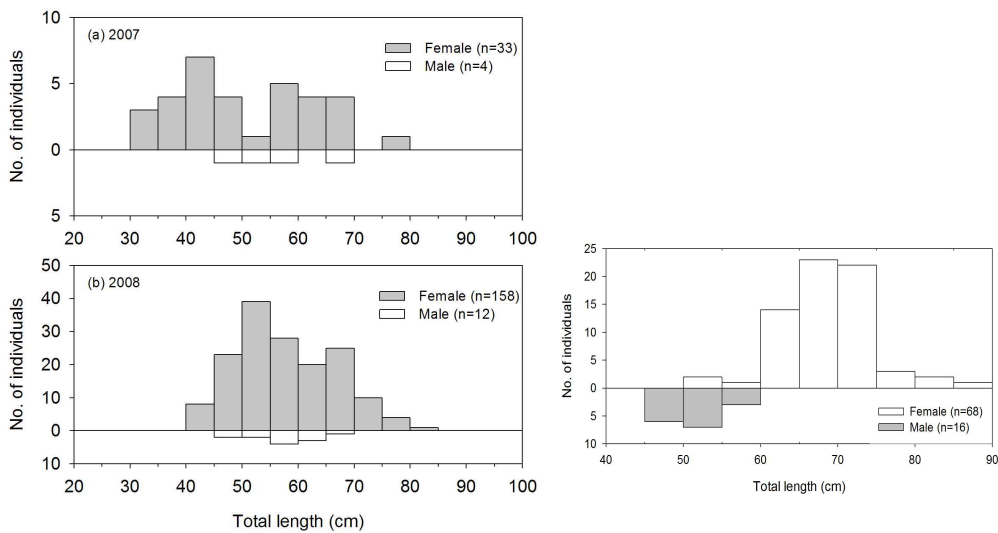


Fig. 1-4. Total length and sex composition of eels collected in the Nakdong River (left) and Han River estuaries (right) between 2007 and 2006

Table 1-2. Total length (\pm SD) of eels collected from the four river estuaries. Undifferentiated 2 eels collected in 2005 from the Geum River estuary and 1 eel collected in 2005 from the Mangyeong River estuary were not included. The symbol 'n' represents the number of specimens examined.

Estuary	Year	Total		Yellow eels		Silver eels	
		Female (n)	Male (n)	Female (n)	Male (n)	Female (n)	Male (n)
Geum River.	2003	56.4 \pm 9.6 (61)	-	45.9 \pm 4.8 (42)	-	61.1 \pm 7.1 (19)	-
	2004	66.0 \pm 7.8 (30)	54.6 \pm 5.6 (2)	58.4 \pm 4.2 (19)	-	70.4 \pm 5.8 (19)	54.6 \pm 5.6 (2)
	2005	56.1 \pm 8.1 (98)	50.3 \pm 1.8 (3)	52.0 \pm 5.2 (29)	-	65.9 \pm 4.7 (18)	50.3 \pm 1.8 (3)
	2006	61.2 \pm 8.6 (59)	51.2 (1)	54.6 \pm 4.8 (32)	-	69.0 \pm 4.6 (20)	51.2 (1)
Man- gyeong River	2003	63.5 \pm 9.5 (16)	51.6 \pm 5.2 (10)	52.4 \pm 4.9 (3)	47.1 \pm 0.4 (3)	60.0 \pm 8.5 (13)	53.5 \pm 0.4 (7)
	2004	57.8 \pm 10.7 (13)	49.1 \pm 5.4 (26)	46.1 \pm 0.4 (3)	45.7 \pm 3.8 (9)	59.9 \pm 10.2 (10)	50.8 \pm 5.4 (17)
	2005	59.0 \pm 7.6 (24)	49.0 \pm 5.1 (46)	55.8 \pm 7.1 (6)	46.6 \pm 4.0 (29)	60.0 \pm 7.0 (18)	53.0 \pm 4.1 (17)
Nakdong River	2007	50.8 \pm 11.8 (33)	56.7 \pm 7.5 (4)	46.0 \pm 9.1 (25)	48.8 (1)	62.0 \pm 8.9 (8)	59.3 \pm 6.6 (3)
	2008	59.4 \pm 8.3 (209)	57.3 \pm 5.2 (27)	52.3 \pm 5.3 (91)	50.6 \pm 4.5 (3)	64.8 \pm 5.7 (118)	58.1 \pm 4.7 (24)
Han River	2009	68.8 \pm 6.2 (68)	51.6 \pm 3.9 (16)	66.3 \pm 8.3 (11)	51.7 \pm 7.4 (2)	69.3 \pm 5.7 (67)	51.6 \pm 3.7 (14)

2) 성숙 단계별 성비율

각 하구에서 채집된 뱀장어의 외형 관찰에 의한 성숙 단계, 즉 황뱀장어와 은뱀장어의 비는 표 1-3과 같다. 그러나 이른 가을 채집된 일부 개체는 황뱀장어와 은뱀장어의 중간 단계도 있었으나, 회유 때에는 은뱀장어로 변형될 것으로 보아 은뱀장어로 구분하였다.

금강에서 채집된 뱀장어는 대부분 암컷이었으며, 4년간 총 6마리의 수컷만이 수집되어 금강 전체의 암수 뱀장어의 비율은 248:6으로 암컷이 주를 이루었으며, 은뱀장어도 암컷이 유의하게 많았다($p < 0.001$, Table 3).

만경강하구에서 수집된 뱀장어의 암수비율은 채집 년도 별로 각각 16:10, 13:26, 24:46이었고(Table 1-3) 암수 은뱀장어 비율에는 유의한 차이가 없었다(2003년 $p = 0.22$, 2004년 $p = 0.27$, 2005년 $p = 0.91$). 또한 3년간 수집된 은뱀장어는 암컷 42마리, 수컷 41마리로 암수 비율의 유의한 차이는 없었다($p = 0.86$).

Table 1-3. Sex ratios of the yellow and silver eels collected in the four river estuaries in Korea. The value of p represent the difference between two proportions of female and male silver eels.

Estuary	Year	Total		Yellow eels		Silver eels		p
		Female (%)	Male (%)	Female (%)	Male (%)	Female (%)	Male (%)	
Geum River	2003	61(100.0)		19(100.0)		42(100.0)		
	2004	30(93.8)	2(6.2)	11(100.0)		19(90.5)	2(9.5)	<0.05
	2005	98(97.0)	3(3.0)	69(100.0)		29(90.6)	3(9.4)	<0.05
	2006	59(98.3)	1(1.7)	32(100.0)		27(96.4)	1(3.6)	<0.001
	total	248(97.6)	6(2.4)	131(100.0)		117(95.1)	6(4.9)	<0.001
Man- gyeong River	2003	16(61.5)	10(38.5)	3(50.0)	3(50.0)	13(65.0)	7(35.0)	0.22
	2004	13(33.3)	26(66.7)	2(18.2)	9(81.8)	11(39.3)	17(60.7)	0.27
	2005	24(34.3)	46(65.7)	6(17.1)	29(82.9)	18(51.4)	17(48.6)	0.91
	total	53(39.3)	82(60.7)	11(21.2)	41(78.8)	42(50.6)	41(49.4)	0.86
Nakdong River	2007	33(89.2)	4(10.8)	25(96.2)	1(3.8)	8(72.7)	3(27.3)	0.2
	2008	209(88.5)	27(11.5)	91(96.8)	3(3.2)	118(83.1)	24(16.9)	<0.001
	total	242(88.6)	31(11.4)	116(96.7)	4(3.3)	126(82.4)	27(17.6)	<0.001
Han River	2009	68(81.0)	16(19.0)	11(13.1)	2(2.4)	57(67.9)	14(16.6)	<0.05

3) 연령 조성

가. 이석의 성장

뱀장어의 이석은 타원형으로 몸의 중심부를 향해 불룩한 형태를 보였고, 가장자리는 굴곡이 심한 것도 관찰되어 핵으로부터의 방향에 따라 이석 성장률이 달랐다. 다름을 보여 주었다. 핵은 이석 중앙보다 앞 쪽 하단 부분에 위치하였고, 후단부로 이석의 성장이 빨랐다. 박편으로 제작한 이석을 암시야 광학현미경에서 관찰하면, 핵 중심부는 투명하고 첫번째 성장정지선인 elver mark부근에서 불투명대가 나타나며, 그 후부터 투명대와 불투명대가 교차하였다(Fig. 1-5). 뱀장어의 육수 연령은 알에서 부화한 자어가 원양에서 회유한 시기를 제외하고 실뱀장어가 하구로 소상하는 시기를 기준으로 하였다. 바다에서 자어기 때 형성된 이석과 육수에서 형성된 부분사이에는 elver mark가 형성되어 이 elver mark를 육수 연령(continental age)의 기준($t=0$)으로 하였다.

Elver mark 이후 투명대와 불투명대가 반복하여 나타나는데, 불투명대내에 있는 성장정지선은 여러 개의 띠를 형성하여 좁게 모여 있는데, 이것은 가을에 수온이 낮아지는 동안 성장이 한번에 멈추는 것이 아니라 뱀장어는 일정 기간을 두고 성장과 멈춤이 반복되었음을 나타낸다. 연륜은 불투명대에서 다음 투명대로 이행되는 부분 즉, 수온이 낮은 가을과 겨울을 지나 수온이 상승하는 봄철로 이행되는 불투명대 내부의 성장정지선이 가장 뚜렷하게 관찰되는 부분으로 정하였다. 실뱀장어로 우리나라연안 및 하구로 가입되는 개체들은 12월부터 4월까지 집중되기 때문에 가입 후에는 수온이 높은 환경에서 성장과 함께 이석의 성장이 빨라지고, 수온이 낮아지는 동계에 성장정지선이 형성되므로, 연륜의 형성 시기는 겨울철로 추정하였다. 대부분의 뱀장어가 가을에 채집되었기 때문에 관찰한 이석의 가장자리는 마지막 성장정지선이 형성되고 채집된 해에 성장한 부분으로 투명대로 이루어져 있었다. 박편으로 제작한 뱀장어 이석에서는 투명대와 불투명대가 잘 구분되고 성장정지선이 뚜렷하여 관찰한 모든 개체의 나이를 정확히 추정할 수 있었다.

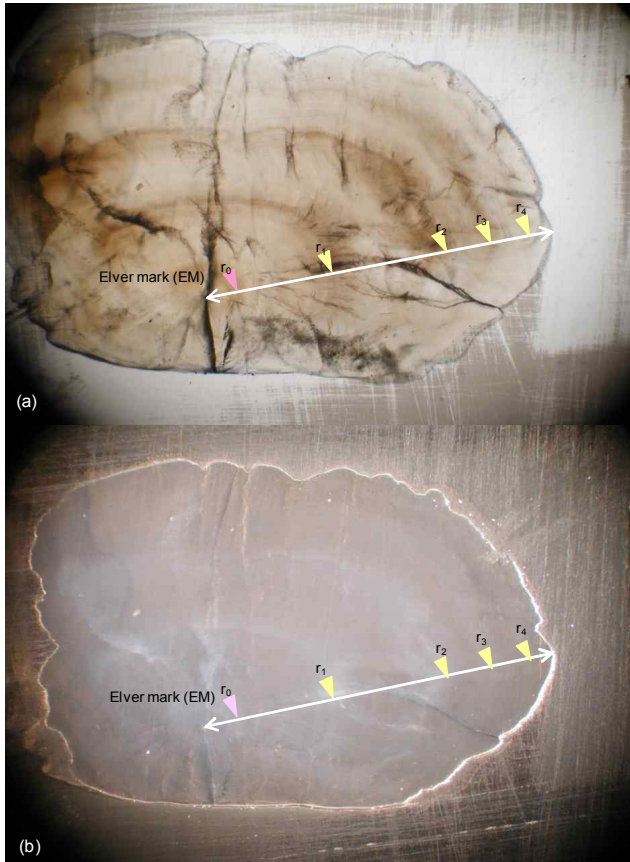


Fig. 1-5. Annuli in eel otolith collected in the Mangyeong River estuary (71.0 cm TL) (a) under transmitted light, and (b) under reflected dark-field light.

나. 연령 조성

금강 하구에서 수집된 뱀장어 이석의 연륜을 관독하여 2003년부터 2006년까지 연령조성을 Table 1-4에 정리하였다. 수컷 은뱀장어 6 마리의 연령은 4세부터 8세까지, 암컷 뱀장어는 3세부터 17세까지 관독되었다. 암컷 황뱀장어는 3세부터 6세까지로 연령범위가 비교적 적은 반면 암컷 은뱀장어의 연령은 3세부터 17세까지로 범위가 넓었다. 연령을 관독한 전체 131마리 중에서 4세군이 38마리로 29%를 차지하여 가장 많았고, 암컷 황뱀장어는 3세와 4세군이 전체의 76%(26마리)로 가장 많았고, 암컷 은뱀장어는 4세와 6세 군이 각각 25%(23마리), 21%(19 마리)를 차지하였고 주로 4세~8세의 뱀장어가 많았다.

만경강 하구에서 수집된 뱀장어 이석 76개의 연륜을 관독한 결과 뱀장어의 연령은 4세부터 11세까지 구성되었다(Table 1-4). 가장 많은 연령군은 5세군으로 33%(25 마리)를 차지하였고, 6세군(26%), 7세군(16%), 4세군(11%), 8세군(9%)으로 연령군이 구성되었으며, 10세 이상은 3마리로 4%를 차지하였다. 수컷 황뱀장어는 4세군(33%)과 5세군(67%)군으로 이루어졌고, 수컷 은뱀장어는 5세군이 50%를 차지하였고, 4세군이 25%, 6세군과 7세군이 25%를

차지하였다. 수컷 황뱀장어의 연령은 4세에서 7세까지 관독되었고, 5세군이 42%(8마리)로 가장 많았고, 6세군이 32%를 차지하였다. 암컷 은뱀장어의 연령은 4세에서 11세까지 관독되었다. 6세군이 33%(12마리)로 가장 많았고, 7세군과 8세군이 각각 19%(7마리)를 차지하여 암컷 황뱀장어에 비해 4세 이하의 연령군 비율이 상대적으로 낮았다. 수컷 은뱀장어 25마리는 5세부터 8세까지 구성되었고, 6세군이 가장 많은 52%를 차지하였다(Table 1-4). 암컷 은뱀장어 23마리의 이석을 분석한 결과 5세부터 9세까지 구성되었고, 7세군의 47.8%를 차지하였다.

Table 1-4. Age composition by sex and maturity stage of eels collected in the 4 river estuaries in Korea.

Sampling site	Year	Stage	Sex	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	17	mean ±SD	n	
Geum R.	2003	Yellow	M													3.5±0.6	15	
			F	8	5	2												
	2004	Silver	M														4.3±0.8	36
			F	4	22	6	4											
	2005	Yellow	M														5.0±0.8	8
			F		2	4	2											
	2006	Silver	M				2										6	2
			F							3	4		1	1		1	10.0±2.8	10
	2007	Silver	M					2	1								7.3±0.6	3
			F				2	6	7	3				1	2		8.3±2.0	21
	2008	Yellow	M														3.6±0.5	11
			F	4	7													
	2009	Silver	M														4	1
			F		1	6	13	2	2								5.9±0.9	24
	Total	Yellow	M														3.9±0.9	34
			F	12	14	6	2										6.3±1.4	6
	Total	Silver	M						2	1							6.3±2.5	91
			F	4	23	12	19	8	12	7			1	2	2	1		
Mangyeong R.	2003	Yellow	M			3										5	3	
			F			1	1										5.5±0.7	2
	2004	Silver	M		2	4	1									4.9±0.7	7	
			F	1	2	5	3	1								6.1±1.1	12	
	2005	Silver	M		1	2	1	1								5.4±1.1	5	
			F			3	5	1	1							6.0±0.9	10	
	2006	Yellow	M		3	3										4.5±0.5	6	
			F															
	2007	Silver	M				1	7	5	4							5.7±0.9	17
			F						2	3	5	1	2	1			8.1±1.5	14
	2008	Yellow	M		3	6											4.7±0.5	9
			F			1	1										5.5±0.7	2
Total	Silver	M		4	13	7	5									5.4±0.9	29	
		F		1	5	12	7	7	1	2	1					6.9±1.5	36	
Nakdong R.	2007	Silver	M				1	1	1							7.0±1.0	3	
			F				1	4	2	1	1						6.7±1.2	9
	2008	Silver	M			2	12	6	2							6.4±0.8	22	
			F			2	2	6	1	2							7.3±1.0	11
Total	Silver	M			2	13	7	3								6.4±0.8	25	
		F			1	6	8	2	3							7.0±1.1	20	
Han R.	2009	yellow	F			3	2					2				6.7±2.3	7	
			M				1					1					7.5±2.1	2
	2010	silver	F		2	5	7	8	12	6	1						7.1±1.5	41
			M			1		3	2	1	1						7.6±1.5	8

연령 판독이 이루어진 222마리 중에서 가장 많은 연령군은 6세군으로 21.6%(48 마리)의 비율을 보였고, 다음으로 4세군이 20.7%(46마리), 5세군이 19.8%(44 마리)로 세 개의 연령군이 전체의 62.2%를 차지하였다(Fig. 8). 10세 이상으로 연령이 판독된 것은 9마리(4.1%)로 고 연령군의 비율은 매우 낮았다. 황뱀장어는 3세군부터 6세군으로 구성되었고, 3세군과 4세군이 전체의 61.3%(38 마리)를 차지하여 가장 많았다. 은뱀장어의 연령군은 3세군부터 17세군으로 구성되었고, 5세군이 25.0%(40 마리)로 가장 비율이 높았다. 다음은 3세군이 17.5%(28 마리), 5세군과 6세군이 15%(24 마리), 7세군이 13.8%(22 마리) 순으로 비율이 높았다 (Table 1-4).

4) 성장

연륜 분석을 실시한 뱀장어의 이석 장반경(OR)과 전장(TL)은 일차 선형관계를 보여 (Fig. 1-6) 이석의 각 연륜까지의 반경은 연륜이 형성되었을 때의 체장과 비례하므로 연륜을 관찰한 개체들의 연륜이 형성되었을 때의 체장을 비례식을 이용하여 역추산할 수 있음을 의미한다. 뱀장어의 각 연륜이 형성되었을 때의 반경(r_i)을 Lea 식에 대입하여 각 연륜이 형성되었을 때의 체장을 역추산하였다. 역추산한 elver mark 형성 때의 체장은 채집시기에 따라 약간의 차이가 있었으나 6.0 cm 내외로 Moon(2002)이 하구에서 채집한 실뱀장어의 평균 체장과 비슷하였다.

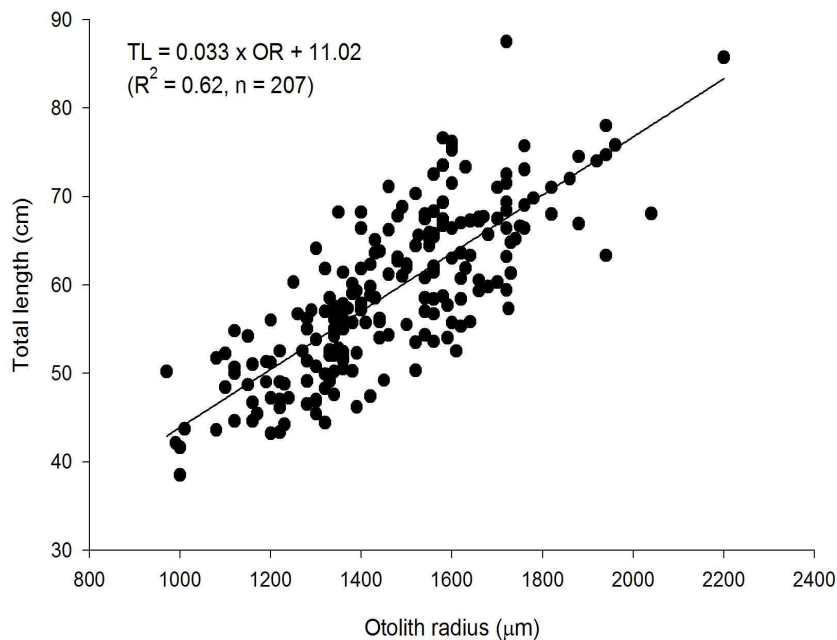


Fig. 1-6 Relationship between otolith radius (OR) and total length (cm) of eels collected from the river estuaries in Korea

역추산한 각 나이의 체장을 이용하여 각 하구 암수의 성장식을 계산하였다.

가. 금강 뱀장어

금강 암컷 뱀장어의 von Bertalanffy 길이 성장식은 다음과 같았다(Fig. 1-7a).

$$L_t = 71.1(1 - e^{-0.25(t + 0.30)}) \quad (R^2 = 0.87)$$

금강 암컷 뱀장어의 전장과 체중의 관계식은 다음과 같았다(Fig. 1-7b).

$$W = 2.01 \times 10^{-4} L^{3.47} \quad (R^2 = 0.77)$$

위 전장-체중 관계식에 von Bertalanffy 길이 성장식을 대입하여 von Bertalanffy 무게 성장식을 계산하면 다음과 같고(Fig. 1-7c) 이론적 최대 무게는 수집된 뱀장어의 최대 무게와 거의 비슷하였다.

$$W_t = 909.4[(1 - e^{-0.23(t + 0.23)})]^{3.47}$$

금강에서 수컷은 총 6마리가 수집되었으며, 암컷 뱀장어의 성장식을 구한 같은 방법으로 Lea 식으로 연륜 형성때의 전장을 계산하여 von Bertalanffy 성장식을 구하였다(Fig. 1-8a).

$$L_t = 57.4(1 - e^{-0.30(t + 0.29)}) \quad (r^2 = 0.89)$$

금강 수컷 뱀장어의 전장과 체중 관계식은

$$W = 4.35 \times 10^{-2} L^{2.1} \quad (r^2 = 0.68)$$

였으며(Fig. 1-8b), 위 식을 이용하여 추정된 von Bertalanffy 무게 성장은 Fig. 1-8c와 같았다.

$$W_t = 214.9[(16. e^{-0.30(t + 0.29)})]^{2.1}$$

금강 암컷 뱀장어의 성장식을 유도한 방법과 같은 방법으로 만경강 암컷과 수컷 뱀장어의 체장 성장, 체장-체중 관계식 및 체중 성장식을 Table 1-5에 정리하고 Fig. 1-9, 1-10에 도시하였으며, 추정된 각 계수와 표준오차(SE)를 Table 1-6에 정리하였다. 금강 뱀장어 암수의 성장은 외형상 암컷이 빠르게 성장하는 것 같지만 계산된 각 계수들은 유의한 차이가 없었고, 만경강에서도 계산된 각 계수의 값이 유의한 차이가 없었다($p > 0.05$). 이것은 금강의 경우 관찰된 수컷의 수가 적어($n=6$) 표준오차($SE=SD/\sqrt{(n)}$)가 커진 때문으로 많은 수의 수컷이 포함되면 차이가 있을 것으로 추정된다. 체장-체중 관계식도 암컷이 큰 b값을 나타내 암컷이 수컷에 비하여 체중의 상대 성장이 빨랐다. 만경강의 경우 암컷과 수컷의 최대전장과 K값이 매우 유사하여 금강과 다른 성장 형태를 보여주었다(Table 1-6).

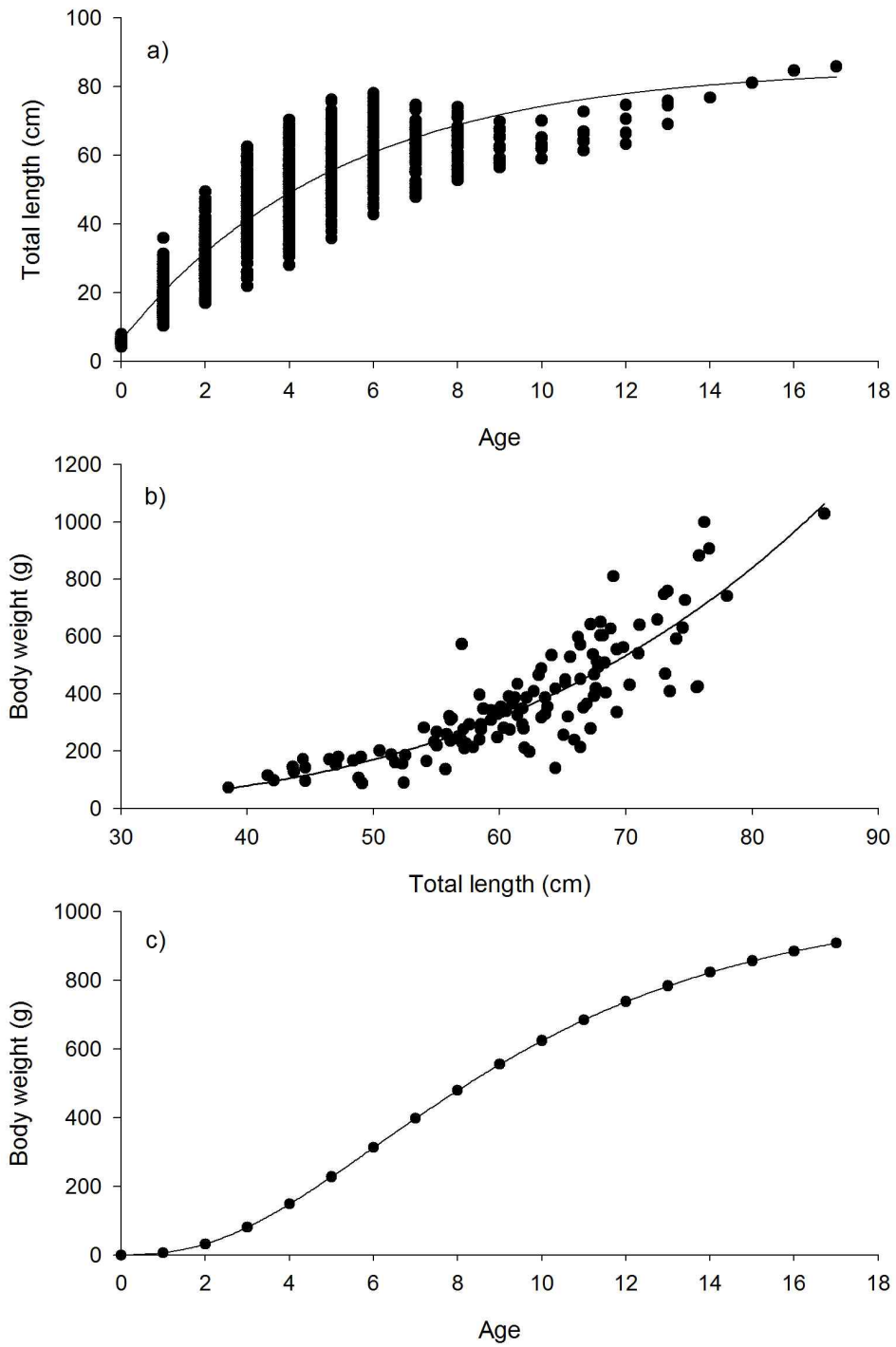


Fig. 1-7. Growth of female eels collected from the Geum River estuary. a) von Bertalanffy length growth curve, b) Length-weight relationship, and c) von Bertalanffy weight growth curve.

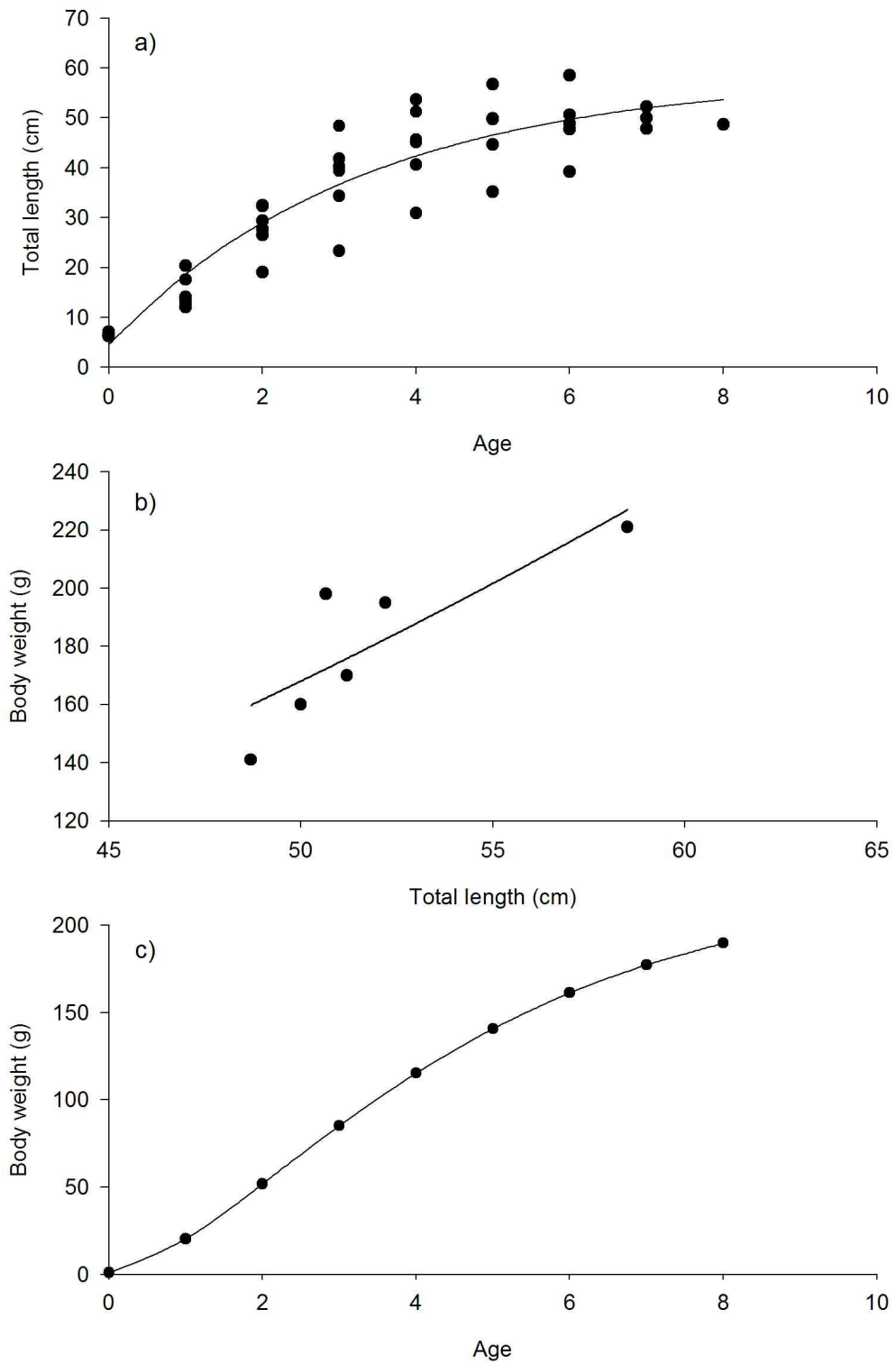


Fig. 1-8. Growth of male eels collected from the Geum River estuary. a) von Bertalanffy length growth curve, b) Length-weight relationship, and c) von Bertalanffy weight growth curve.

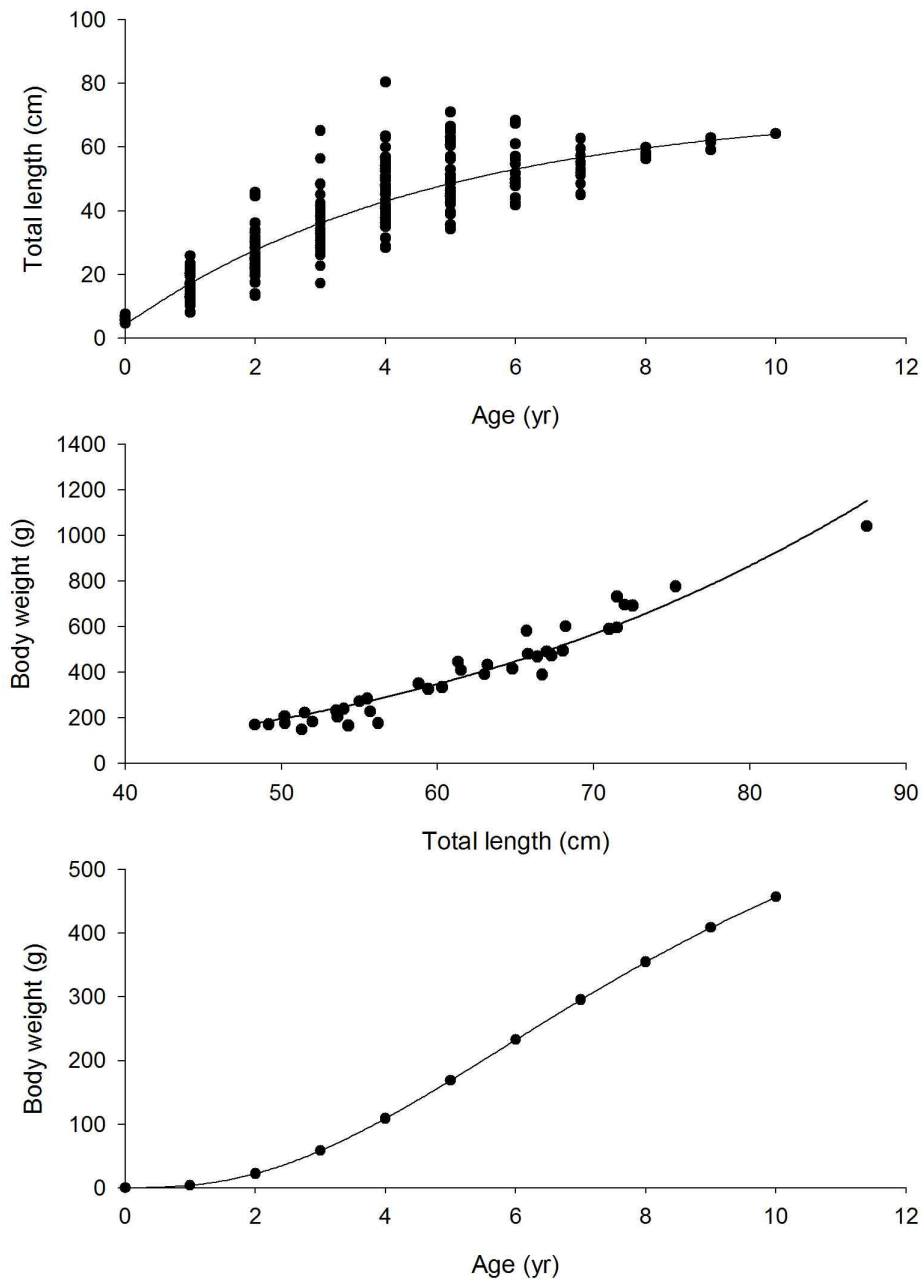


Fig. 1-9. Growth of female eels collected from the Mangyeong River estuary. a) von Bertalanffy length growth curve, b) Length-weight relationship, and c) von Bertalanffy weight growth curve.

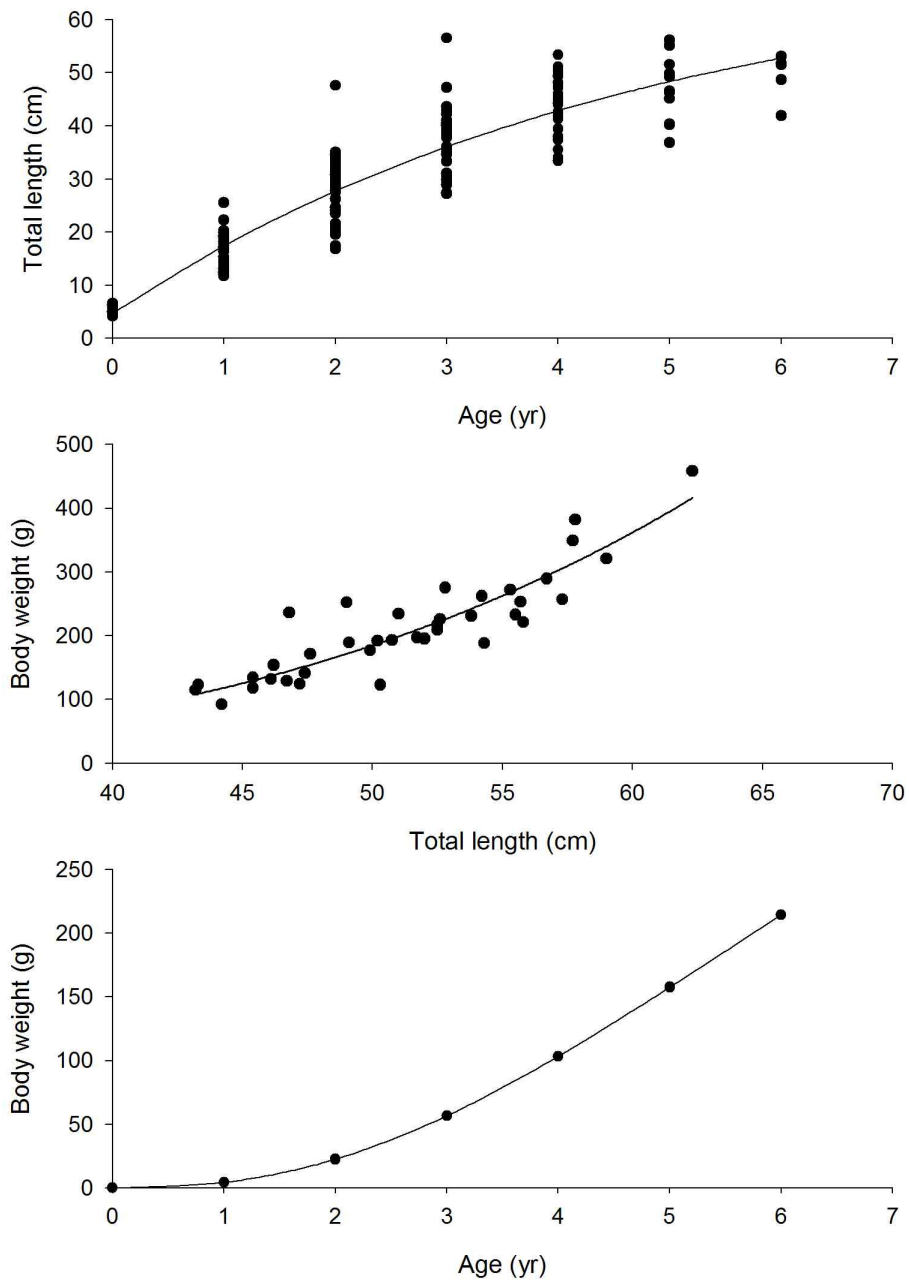


Fig. 1-10. Growth of male eels collected from the Mangyeong River estuary. a) von Bertalanffy length growth curve, b) Length-weight relationship, and c) von Bertalanffy weight growth curve.

Table 1-6. Von Bertalanffy length growth, length-weight relationship and von Bertalanffy weight growth equation of eels collected from the (a) Geum River, (b) Mangyeong River and Nakdong River estuaries.

a) Geum River						
	Female (n=125)			Male (n=6)		
Length	$L_t=85.7(1-e^{-0.194(t+0.391)})(R^2=0.86)$			$L_t=58.5(1-e^{(-0.302(t+0.271))}(R^2=0.87)$		
TL-BW	$W = 2.01 \times 10^{-4}L^{3.47} \quad (R^2=0.77)$			$W = 4.35 \times 10^{-2}L^{2.11} \quad (R^2=0.68)$		
Weight	$W_t=1024.8[(1-e^{-0.194(t+0.391)})]^{3.47}$			$W_t=227.6[(16.^{-0.302(t+0.271)})]^{2.11}$		

b) Mangyeong River						
	Female (n=38)			Male (n=38)		
Length	$L_t=77.5(1-e^{-0.191(t+0.283)})(R^2=0.87)$			$L_t=71.6(1-e^{-0.216(t+0.30)})(R^2=0.91)$		
TL-BW	$W = 3.33 \times 10^{-5}L^{3.93} \quad (R^2=0.87)$			$W = 5.96 \times 10^{-4}L^{3.23} \quad (R^2=0.83)$		
Weight	$W_t=885.9[(1 - e^{-0.191(t+0.283)})]^{3.93}$			$W_t=649.0[(1-e^{-0.216(t+0.30)})]^{3.23}$		

c) Nakdong River						
	Female (n=20)			Male (n=25)		
Length	$L_t=100.7(1-e^{-0.153(t+0.384)})(R^2=0.96)$			$L_t=76.4(1-e^{-0.209(t+0.331)})(R^2=0.93)$		
TL-BW	$W = 7.03 \times 10^{-5}L^{3.74} \quad (R^2=0.94)$			$W = 2.33 \times 10^{-3}L^{2.90} \quad (R^2=0.85)$		
Weight	$W_t=2179.1[(1-e^{-0.155(t+0.359)})]^{3.74}$			$W_t=672.2[(1-e^{-0.209(t+0.331)})]^{2.90}$		

Table 1-7. Estimated von Bertalanffy equation parameters and the and the adjusted standard errors. 'NS' represented the non significant difference ($p>0.05$) of the von Bertalanffy parameters between female and male eels.

Von Bertalanffy parameter	Geum River					Mangyeong River				
	Female		Male		Dif	Female		Male		Dif
	Est.	SE	Est.	SE		Est.	SE	Est.	SE	
L_∞	71.1	1.6	57.4	7.01	NS	72.4	4.8	71.9	6.6	NS
k	0.25	0.01	0.3	0.08	NS	0.21	0.03	0.21	0.03	NS
t_0	-0.3	0.04	-0.29	0.18	NS	-0.3	0.09	-0.32	0.07	NS

5). 서식처 유형

가. EPMA와 LA-ICPMS의 Sr/Ca 비 자료 비교

본 연구에서 이석의 미량원소 분석에서는 일부 이석은 EPMA로 분석하였고, 나머지는 LAICPMS로 분석하였다. 분석 기기에 따라 차이가 있는지 확인하기 위해서 EPMA 실험에서 Sr/Ca 비가 각각의 서식처 타입을 대표할 수 있는 이석 시료 4개를 선택하여(river eel: 47.6 cm TL, river-estuarine eel: 76.6 cm TL, estuarine eel: 61.6 cm TL, estuary-sea eel: 87.5 cm TL), LA-ICPMS분석 결과와 비교하였다. EPMA 분석과 LA-ICPMS 분석을 통해 얻은 뱀장어 이석의 Sr/Ca 비는 일차 선형관계를 나타냈으며(Fig. 1-11, $R^2 = 0.71$), 회귀 직선의 기울기는 1과 유의하게 다르지 않았다($p < 0.001$). 따라서 이후 분석에서는 두 기기에서 나온 자료를 구분하지 않고 분석하였다.

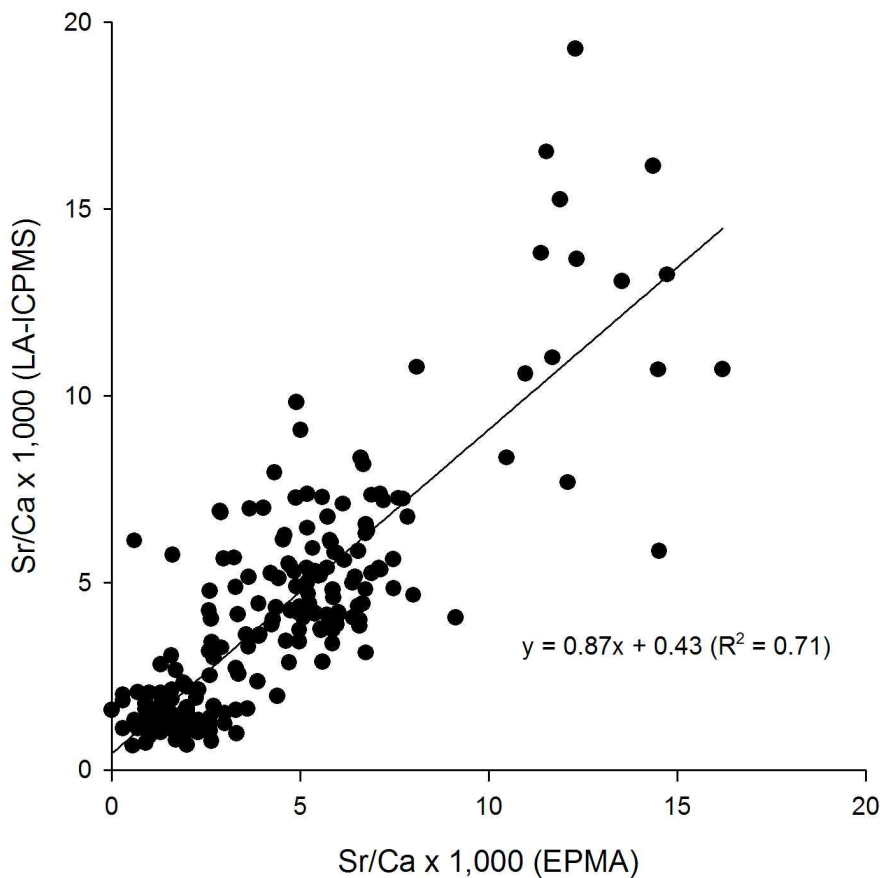


Fig. 1-11. Scatter diagram and linear regression of Sr/Ca ratios in otoliths analyzed with EPMA and LA-ICPMS.

나. 서식처 유형

뱀장어가 부화된 이후 해양 치어기 시기를 거치면서 실뱀장어로 변태하는 elver mark 까지 평균 이석반경(r_0)은 $146.8 \pm 9.3 \mu\text{m}$ ($120 - 170 \mu\text{m}$, $n=224$)로, 이 시기까지 Sr/Ca 비율이 높은 값을 나타내었다. 실뱀장어 이후 육수 생활기 동안의 서식처 이동을 분석하기 위해서 Tsukamoto and Arai (2001)에 따라 평균 Sr/Ca 비가 2.5×10^{-3} 이하의 무리는 river eel, $2.5 - 6.0 \times 10^{-3}$ 범위에 해당하는 무리는 estuary eel, 6.0×10^{-3} 이상의 무리는 sea eel로 크게 구분한 후에, Estuary type의 eel은 Sr/Ca 비율의 변화 패턴에 따라 river-estuary eel과 estuary eel로 세분화하였고, sea type도 Sr/Ca 비가 6.0×10^{-3} 보다 적은 값을 가지는 부분이 많아 estuary-sea type으로 구분하였다.

River type

이 유형에 속하는 뱀장어의 Sr/Ca 비율은 elver mark 이후부터 이석 가장자리까지 큰 변동이 없이 $0.0 - 3.6 \times 10^{-3}$ 범위에서 유지되었고, 평균(\pm SD) Sr/Ca 비율은 $1.8 \pm 0.8 \times 10^{-3}$ 이었다 (Fig. 1-12a). 이 유형에 속하는 뱀장어는 원양에서 강하구로 유입된 후 강상류로 이동하여 담수 환경에서 계속 성장하고 은뱀장어가 되어 하구로 이동한 개체들로 판단된다.

River-estuary typ

이 유형에 속하는 뱀장어의 Sr/Ca 비율 변화는 elver mark 이후 담수환경에서 일정 기간 동안 성장한 후, 하구역으로 서식처를 옮기는 생활 패턴을 나타내며, Sr/Ca 비율은 $0.0 - 10.9 \times 10^{-3}$ 범위로 변동 폭이 컸으며 평균(\pm SD) Sr/Ca 비율은 $4.4 \pm 3.1 \times 10^{-3}$ 이었다 (Fig. 1-12b). 이 유형에 속하는 뱀장어는 모두 어린 시기에 민물에서 산 후 기수환경에서 자란 것들이었으며, 그 반대의 경우는 거의 없었다.

Estuary type

이 유형에 속하는 뱀장어는 대양에서 회유하여 연안에 도착하여 강하구를 통하여 강상류로 이동하지 않고, 하구역에서 성장한 것으로, 가장 많은 뱀장어가 이 서식처 유형에 포함되었다. Sr/Ca 비율은 $0.2 - 14.6 \times 10^{-3}$ 범위였으며, 평균(\pm SD) Sr/Ca 비율은 $4.4 \pm 1.6 \times 10^{-3}$ 이었다 (Fig. 1-12c).

Estuary-sea type

이 유형에 속하는 뱀장어는 전체 생활사 동안 연안 가까이에서 성장한 것으로, Sr/Ca 비율의 범위가 $2.8 - 11.7 \times 10^{-3}$ 로 하구역의 비교적 염분이 높은 곳에서 성장한 개체들로 보인다. 이 유형에 속하는 뱀장어 이석의 Sr/Ca 비율은 $6.3 \pm 1.4 \times 10^{-3}$ 이었으며 (Fig. 1-12d), 대부분 초기에는 Sr/Ca의 비가 6.0×10^{-3} 보다 낮아 본 연구에서는 estuary-sea type으로 구분하였다.

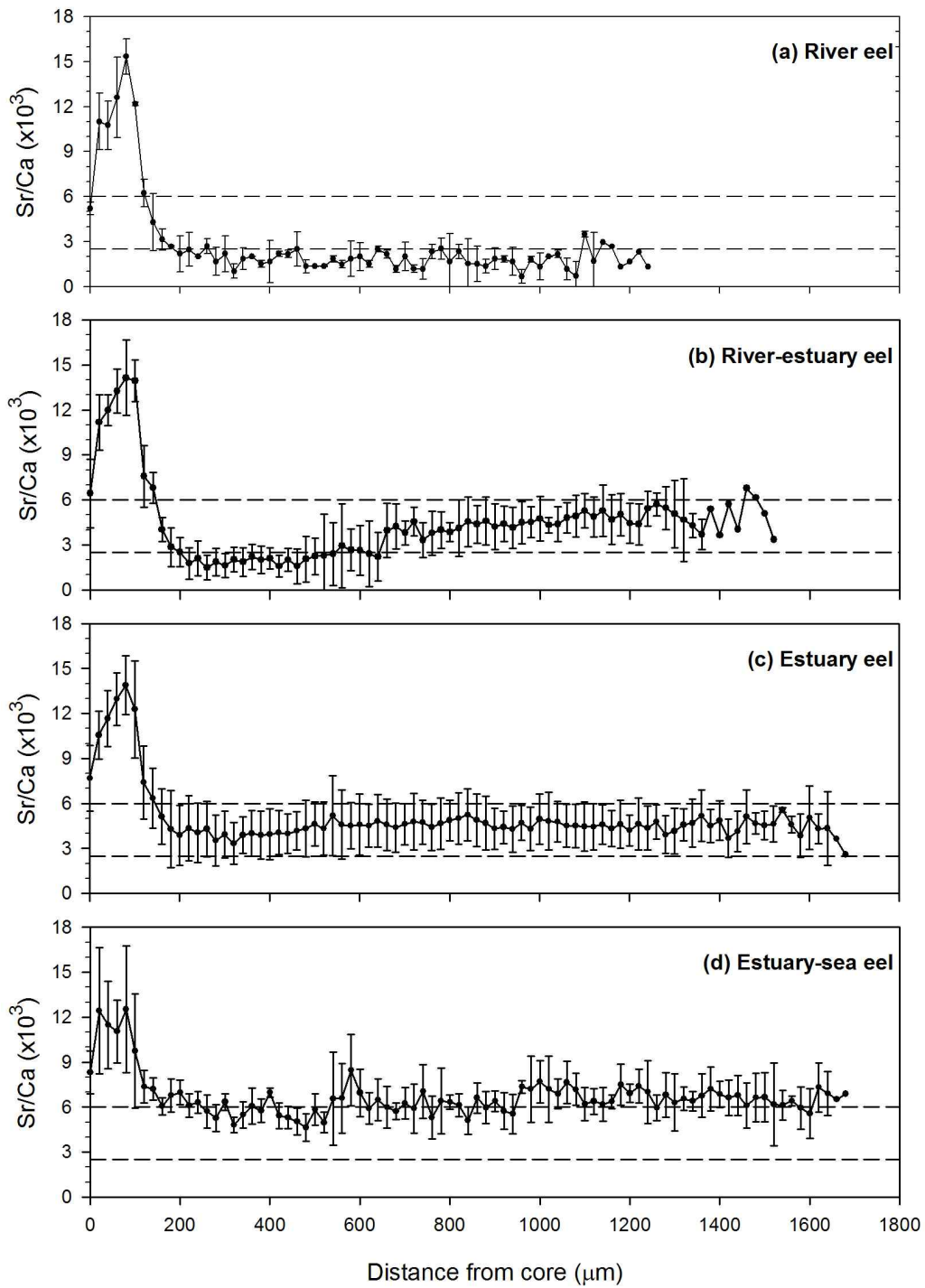


Fig. 1-12. Habitat types of *A. japonica* collected from the Geum River and Mangyeong River estuaries. Upper and lower dash line indicated the 2.5×10^{-3} and 6.0×10^{-3} Sr/Ca ratios of *A. japonica* (Tsukamoto & Arai, 2001). Vertical bars are the standard deviation.

다. 서식처 이용

금강 뱀장어 중 암수 은뱀장어 53마리 이석의 미량원소를 분석하여 서식처 이용 양상을 분석하였다. 금강의 암컷 은뱀장어(n=48) 중에서 15마리(28.8%)는 river type에 속했으며 평균 (\pm SD) Sr/Ca 비는 $1.7 \pm 0.3 \times 10^{-3}$ 이었다. River-estuary type의 뱀장어는 11마리(23.1%)이었고 평균 Sr/Ca 비율은 $3.0 \pm 0.5 \times 10^{-3}$ 이었다. Estuary type은 22마리(48.1%)로 암컷 뱀장어 중에서 비율이 가장 높았고 평균 $3.9 \pm 0.8 \times 10^{-3}$ 이었다. 금강의 수컷 뱀장어는 river, river-estuary, estuary type이 각각 2마리, 1마리, 2마리씩으로 구성되었고, 금강 뱀장어는 암수 모두 sea type의 서식처 이용 형태는 나타나지 않았다(Table 10).

만경강에서는 은뱀장어 53마리를 대상으로 서식처 이용 양상을 분석하였다. 암컷 은뱀장어 29 마리 중 river type 은 13마리(40.6%)이었고, 평균(\pm SD) Sr/Ca 비율은 $1.5 \pm 0.2 \times 10^{-3}$ 이었다. River-estuary type의 뱀장어는 총 2마리가 채집되었고(12.5%, $3.6 \pm 0.8 \times 10^{-3}$) estuary type은 8마리가 채집되어(28.1%, $4.1 \pm 1.1 \times 10^{-3}$), 하구역 서식처를 이용하는 두 가지 type 뱀장어의 비율과 하구 상류(강)의 서식처를 이용하는 암컷의 비율이 비슷하였다. 금강에서 관찰되지 않은 sea type의 뱀장어가 6마리(18.8%, $6.4 \pm 0.4 \times 10^{-3}$)포함되어, 만경강의 암컷 뱀장어는 4가지 서식처를 고르게 이용하고 있었다. 만경강 수컷 뱀장어는 river type이 13마리(53.8%)로 가장 많았고, 평균 Sr/Ca 비율은 $1.7 \pm 0.3 \times 10^{-3}$ 이었다. estuary type이 8마리(34.6%, $3.6 \pm 0.8 \times 10^{-3}$), river-estuary type이 3마리(11.5%, $3.4 \pm 0.3 \times 10^{-3}$) 순이었다. 만경강 수컷 뱀장어에서도 sea type 뱀장어는 관찰되지 않았다(Table 1-7).

금강 뱀장어의 주요 서식처는 이용 유형은 estuary type으로 45.3%를 차지하였으며, river-estuary type의 뱀장어를 포함할 때 67.9%에 달하였고, river type 뱀장어가 32.1%를 차지하고 있어, 금강의 뱀장어는 주로 하구역을 중심으로 서식처를 형성하고 있었음을 알 수 있다. (Fig. 1-13).

Table 1-7 Habitat types of silver eels collected from the Geum River and Mangyeong River estuaries. R-E and E-S represent the river-estuary type and estuary-sea type, respectively.

Estuary	Year	Female				Male				Total
		River	R-E	Estuary	E-S	River	R-E	Estuary	E-S	
GR.	2003		4	14					18	
	2004	8	1	1		1	1		12	
	2005	7	6	7		1		2	23	
	Total	15	11	22		2	1	2	53	
MR	2003		2	5	6	1	2	4	20	
	2005	13		3		12	1	4	33	
	Total	13	2	8	6	13	3	8	53	
Total		28	13	30	6	15	4	10	106	

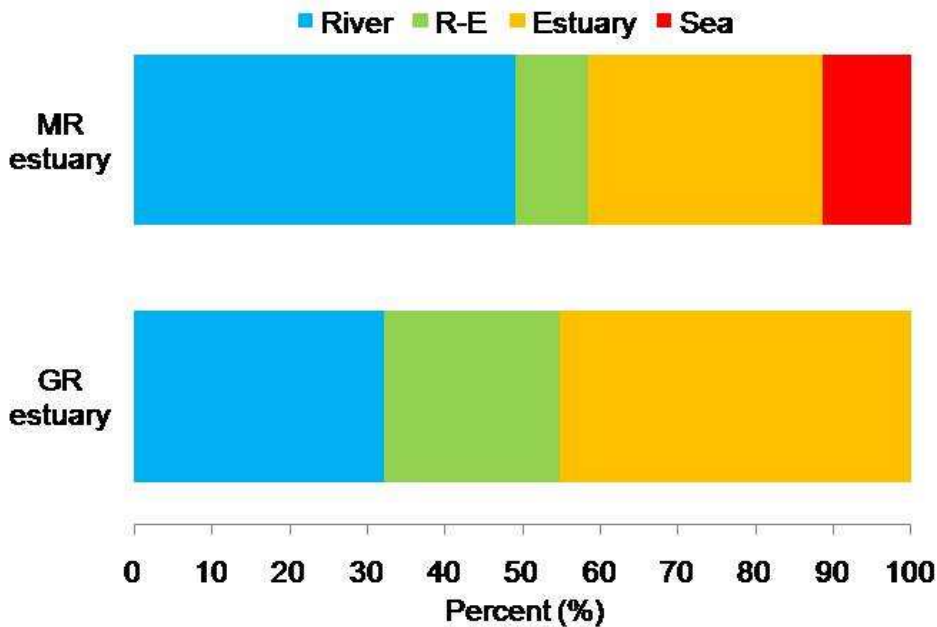


Fig. 1-13. Habitat use of silver eels collected from the Geum River (GR) and the Mangyeong River (MR) estuaries.

만경강 뱀장어의 주요 서식처 유형은 river type이 단일유형으로 46.6%를 차지하였다. 두 하구의 river type의 비만을 비교할 때 금강의 river type 비율이 만경강에 비하여 유의하게 낮았다(t -test, $p < 0.05$). 금강과 비교할 때 하구역 서식처인 river-estuary type과 estuary type의 비율이 상대적으로 적었지만, 만경강 뱀장어의 두 서식처 유형의 비율은 river type 과 유사하였다. 또한 가입 후 하구나 강으로 이동하지 않고 연안 가까운 서식처에서 머물며 성장한 estuary-sea type도 약 10%가 있어, 만경강의 뱀장어는 서식처 선택에 있어 공간적으로 넓은 서식처를 이용하고 있었다(Fig. 1-13).

라. 서식처에 따른 연령 조성과 성장

금강하구 은뱀장어 중 이석 미량원소를 분석한 암컷 중에 river type은 7세 이상으로 평균 나이가 9.0 ± 1.6 세였다(Table 1-8). 이에 비하여 river-estuary type 이나 estuary type 은 한 개체씩을 제외하고는 3-9세 사이로 river-estuary type의 평균 연령이 6.9 ± 2.8 세, estuary type은 6.1 ± 3.0 세로 점점 낮아져, 담수 서식 뱀장어에 비하여 하구 서식 기간이 길수록 은뱀장어의 평균 연령이 낮아져, 수컷 은뱀장어는 5 마리만 분석하였으며, 6-8세 사이였다.

만경강에서는 고연령어는 채집되지 않았고 암컷 뱀장어는 river type(I)에서 estuary-sea type(IV)으로 갈수록 7.9 ± 1.5 세에서 6.0 ± 0.9 세로 감소하여, 금강과 같이 서식처

가 강에서 바다 쪽으로 갈수록 은뱀장어의 평균 연령이 낮아졌다. 수컷의 평균 연령은 5-8 세사이로 금강과 같이 서식처별 연령분포는 일정하지 않았다(Table 1-8).

금강과 만경강의 암컷과 수컷의 연평균 성장률을 구하여 산란회유 나이와 비교하였다. 금강과 만경강 뱀장어 모두 성장률이 빠를수록 산란회유에 참여하는 나이가 젊어지는 경향이 나타났으며, 성장률이 같은 조건에서는 암컷 은뱀장어에 비해 수컷 은뱀장어의 산란회유 연령이 더 어린것으로 나타났다(Fig. 1-14).

Table 1-8. Age composition for each habitat type of silver eels collected from Geum R. and Mangyeong River. Type I: river, II: river-estuary, III: estuary, IV: estuary-sea

Site	Sex	Type	AGE											Total	mean±SD	
			3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13			17
Geum River	F	I					2	4	6		1	2			15	9.0±1.6
		II	1	2		2	1	3	1				1		11	6.9±2.8
		III	2	5	3	4	3	3						1	21	6.1±3.0
		IV														-
	Total	3	7	3	6	6	10	7		1	2	1	1	47	7.2±2.8	
M	I				1		1							2	7.0±1.4	
	II				1									1	6.0	
	III					2								2	7.0±0.0	
	IV														-	
Total				2	2	1								5	6.8±0.8	
Manky eong River	F	I				2	3	4	1	1	1				12	7.9±1.5
		II			1	1	1			1					4	7.0±2.2
		III		1		2		2		1					6	7.0±2.1
		IV			2	2									4	6.0±0.9
	Total		1	3	7	4	6	1	3	1				26	7.2±1.7	
M	I			1	5	5	3							14	5.7±0.9	
	II			2	1									3	4.3±0.6	
	III				7	1	1							9	5.3±0.7	
	IV													0	-	
Total			3	13	6	4							26	5.4±0.9		

암수 뱀장어 구분을 하지 않고, 채집 하구를 구분하지 않은 조건에서 서식처 유형별로 연평균 성장률을 비교하면 river type이 7.3±1.5 cm/yr로 가장 낮은 반면 estuary-sea type은 11.6±1.5 cm/yr로 성장률이 가장 높아 서식처 유형별로 성장률의 유의한 차이가 있었다(ANOVA, $p < 0.001$). 이 결과는 채집하구별 암수 뱀장어별로 구분하였을 때에도 같아, 금강 암컷 뱀장어와 만경강 암수 뱀장어 에서 river type의 은뱀장어에 비해 river-estuary type 혹은 estuary-sea sea type의 은뱀장어가 성장률이 높은 경향이 있었다(ANOVA, $p < 0.05$, Table 1-9). 금강 수컷 은뱀장어는 시료수가 적어 분석에서 제외하였다.

Table 1-9. Mean annual growth rate of silver eels according to the habitat types.

Habitat type	Geum River	Mangyeong River	
	Female (cm/yr)	Female (cm/yr)	Male (cm/yr)
River	7.0±1.6	6.8±1.6	8.2±1.1
River-Estuary	9.9±3.4	9.1±1.1	11.5±1.2
Estuary	10.2±2.9	8.2±1.9	9.0±1.2
Estuary-Sea	-	11.6±3.0	-

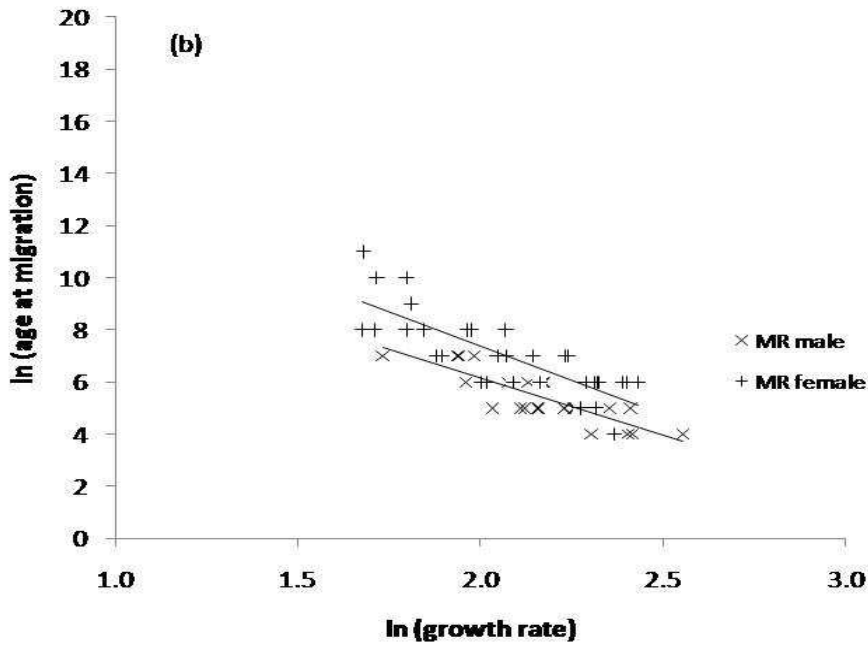
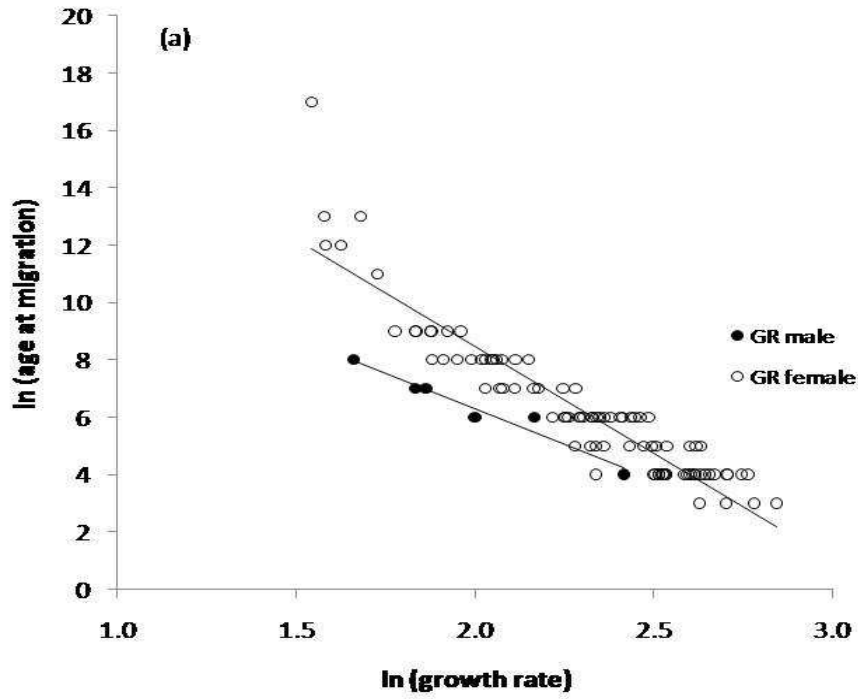


Fig. 1-14. Correlation between age at downstream migration and growth rate (\ln transformed) of silver eel collected from (a) Geum River and (b) Mangyeong River.

다. 토의

1) 뱀장어 자원 밀도

국내 하구나 하천에서는 1970년대까지는 수 천 톤이 어획되었으나, 1980년대 이후 극감하여 뱀장어를 주 대상으로 하는 어업은 거의 중단되었다. 현재 일부 어부가 가을에만 일부 조업하기 때문에 본 연구에 이용된 뱀장어 표본은 각 하구의 어부에게 의뢰하여 수집하였다. 금강 하구에서는 주로 이각망 어업에서, 만경강하구에서는 개량형 안강에서 부수적으로 어획된 뱀장어를 수집하였다. 뱀장어는 8월에서 11월 사이에 어획되며, 어획되는 양이 적고 간헐적으로 어획되기 때문에 뱀장어 생산량을 정량화하기는 어렵다. 본 조사에서는 성숙한 뱀장어가 바다로 산란회유하기 위해 이동하는 시기가 포함되도록 9월부터 11월까지 수집하여 은뱀장어의 채집이 가능하도록 하였다.

금강 하구에서는 이각망 어부에게 의뢰하여 조업 기간 중 어획된 뱀장어 중 각 월에 가장 많이 잡혔을 때 2-3일 간의 모든 뱀장어를 구입하여 조업 기간 중 잡힌 뱀장어의 30% 이상을 구입하였으며, 만경강에서는 2004년과 2005년 안강망에서 부수적으로 잡힌 거의 모든 뱀장어를 수집하였다. 낙동강 하구에는 뱀장어 자료를 수집할 수 있는 어업이 없어 2007년과 2008년 9월에서 10월 사이 현지 어부에게 400 개의 통발을 투망하게 하여 어획된 모든 뱀장어를 수집하였다. 2007년에는 채집 한 달 후 높은 파도로 상당수의 통발이 유실되었고 한달간 어획된 총 개체수가 40 마리였다. 2008년에 다시 400개의 통발은 투하하여 2달간 239마리의 뱀장어만이 어획되었다. 또 한강 하류지역인 강화도 근해에서 2009년 약 한 달간 건강망과 안강망에 어획되는 뱀장어를 수집한 결과 85마리에 그쳤다. 이 결과는 두 하구의 뱀장어 자원량 수준이 매우 낮다는 것을 간접적으로 나타낸다.

가까운 일본의 경우 산란회유 시기인 10월과 12월 사이에 정치망류 어구를 사용하여 611마리를 채집한 것과 비교하면(Okamura et al., 2007), 우리나라 하구의 뱀장어 자원량이 얼마나 적은지를 알 수 있으며, 국내 대부분 하구는 수질이 악화되어 뱀장어 살기에 부적합한 것을 간접적으로 나타낸다. 특히 낙동강 하구에는 하구둑이 막혀 뱀장어의 상류로의 이동이 제한된 것도 한 이유로 추정된다.

뱀장어 어획에 이용된 그물의 끝자루 망목과 통발의 망목이 10 mm 정도로 어획된 뱀장어의 최소 체장은 29~35 cm였다. 서식처유형 결과에 나타난 것과 같이 하구역에서 성장기를 보내는 뱀장어가 40~70% 내외였으나, 30 cm 이하의 뱀장어가 채집되지 않은 것은 작은 개체들이 큰 망목 때문에 잡혔어도 그물을 빠져 나갔거나, 어구를 하구의 깊은 골에 투망하였기 때문에 작은 개체들이 보다 얕은 곳에 서식하여 잡히지 않았을 가능성이 있다. 그러나 일부 채집된 35 cm 이하 개체는 암수를 구분할 수 없었고, 40 cm가 넘는 개체도 일부는 성분화가 되지 않아 연령이나 성장 분석에서 제외하였고, 황뱀장어는 채집지역인 하구에

서 서식하는 개체들이 주로 채집될 가능성이 크기 때문에 서식처 유형 분석에는 은뱀장어만을 이용하였기 때문에 망목 선택에 의한 영향은 적었을 것으로 추정된다. 또 은뱀장어는 모두 35 cm 보다 크기 때문에 성비나 성장 추정에는 수집된 표본은 문제가 없는 것으로 판단된다. 또한 금강과 만경강 수괴 전체에서 뱀장어를 채집하지 않았지만 뱀장어의 회유특성을 고려하여 바다와 인접해 있는 강하구 지역에서 채집이 이루어져 상류로부터 산란회유에 참여하기 위해 이동한 뱀장어뿐만 아니라, 하구주변 및 하구와 인접한 연안에 서식하는 뱀장어까지 채집이 가능하였다. 즉, 본 연구에서와 같이 바다와 인접한 하구에서 채집한 은뱀장어는 어느 환경에서 성장했는지에 관계없이 전생활사에 대한 정보를 제공해 줄 수 있어, 강 전체의 뱀장어생활사를 반영할 수 있을 것으로 판단된다.

금강과 만경강에서 채집한 어구와 채집 기간 및 실 조업시간 등이 상이하기 때문에 자료 수집 기간 동안의 두강에 서식하는 뱀장어의 밀도를 추정하기에는 문제점이 있다. 특히 뱀장어 자원량 추정을 하기 위해서 단위노력당 뱀장어 어획량을 파악해야하는데, 개량안강망이나 이각망 등과 같이 수동어구에 부수적으로 어획되는 양만으로는 정확한 자료를 얻을 수 없기 때문에 연구 여건이 충족되면 각 하구에서 특별히 제작된 채집기기를 이용하여 자료를 수집하여 분석할 필요가 있다.

2) 성비

각 하구에서 암수의 성비는 황뱀장어와 은뱀장어가 달랐다. 금강의 경우 수컷 황뱀장어는 한 마리도 채집되지 않았고 은뱀장어만 6마리 채집되었다(Table 1-3). 만경강의 경우는 수컷이 황뱀장어에서 많았다. 이것은 각 하구에서 암수에 따라 서식처 이용이 다를 수 있기 때문에 성비의 분석에는 은뱀장어 자료만을 이용하였다. 금강, 만경강에서 수집한 은뱀장어의 성비는 채집 하구별로 차이가 있었다. 금강은뱀장어는 4년간 수컷이 6마리만 채집되었고 나머지 117마리는 암컷이 차지하여, 암컷이 유의하게 많았지만, 만경강에서 은뱀장어는 암컷이 42 마리, 수컷이 41마리가 채집되어 암수차이가 유의하지 않았다.

자연 상태에서 뱀장어의 성비율은 일반적으로 암수 비가 비슷하나 암컷이 우점하거나 또는 수컷이 우점하는 경우처럼 채집 지역에 따라 큰 차이를 보였다(Han et al., 2003; Han and Tzeng, 2006; McCleave and Jellyman, 2004; Oliveira, 1994; Oliveira, 1999; Oliveira and McCleave, 2002; Oliveira et al., 2001; Tzeng et al., 1995; Tzeng et al., 2002). 암수 비가 지역마다 다른 이유에 대하여는 서로 다른 원인이 제안 되었다. 뱀장어의 성별을 결정은 서식환경의 영향을 받는 것으로 알려져, 뱀장어 각 개체의 초기 성장률이 빠른 경우나 (Holmgren and Mosegaard, 1996), 초기 성장기에 수온이 높은 환경에서 성장률이 빠른 개체들이 수컷으로 분화될 가능성이 제안되었다(Holmgren, 1996). 또, 위도를 결정 요인으로

제안하였으나 고위도에서 암컷이 우점한 경우도 있고(Valdykov, 1966; Helfamn et al., 1987), 수컷이우점하는 경우가 있어(Kruger & Oliveira, 1997) 일반화 하기는 어렵다. 또 서식지의 유속에 따라 강이나 호수와 같이 유속이 거의 없는 곳에서는 암컷이 우점하고 흐르는 강에서는 수컷이우점한다고 제안하였고(Sinha and Jones, 1967; Oliveira et al. 2001), 그리고실뱀장어 시기에 담수에서 성장하는 개체들은 수컷으로 성분화하는 경향이 보고되었다(Han and Tzeng, 2006). 또 많은 연구에서 뱀장어의 밀도가 성별을 결정하는데 결정적인 역할을 한다고 보고하여 밀도가 높으면 수컷이 우점하고, 밀도가 낮으면 암컷이 우점한다고 제안하였다(Degani and Kushnirov, 1992; Krueger and Oliveira,1999; Oliveira et al., 2001; Parson et al., 1977; Roncarati et al., 1997; Tzenget al., 1995)

금강의 경우 암컷이 우점하였고, 만경강의 경우 암수 비율이 1:1과 유의한 차이가 없었다. 만경강이나 금강은 서로 인접하여 있고 모두 뱀장어 서식밀도가 낮아 서식 밀도나 위도가 암수 분화를 결정한다고 보기는 어렵다. 금강 하구는 하구둑의 영향으로 뱀장어가 상류로 이동하는 경로가 하구둑에 설치된 어도로만 이동이 가능하다. 금강과 낙동강 하구둑에는 회유성 어류를 위한 어도가 설치되어 있지만 유영역이 강한 어류를 대상으로 설계되어 있고(황, 2000, 2003), 중대형 어류 일부가 계단식 어도를, 소형어류는 돌망태 어도를 이용하여 소량 이동할 뿐 뱀장어의 소상에는 큰 역할을 하지 못하는 것으로 보고되었다(강등, 2007; 장 등, 2009). 반면, 만경강 하구에서는 2006년 새만금 방조제 물막이 공사가 끝나기 전에 자료를 수집하여 채집 때까지는 만경강 하구에서는 뱀장어가 상류로 이동하는데 장애가 적은 편이었다. 서식처이동 결과에서와 같이 담수에서 생활사를 보낸 뱀장어의 비가 금강에서는 만경강에 비하여 유의하게 적었다. 만경강하구 새만금 방조제가 건설 중이었던 2003년 만경강과 금강하구의 어류 종조성을 비교한 결과에 의하면 금강 하구 어류 종조성은 천수만과 같은 내만과 유사한 연안 어류상을 보였고, 만경강 하구는 하구역 어류상을 나타내어 본 연구 뱀장어 채집시기에 만경강 하구는 하구 어류상을 유지하고 있었다(Hwang, 2006). 자연적으로 강과 바다가 연결되어 있었던 만경강 하구는 다양한 어류의 서식 및 성육 환경으로 이용되고 있었기 때문에, 금강에 비해 뱀장어의 이동과 성장에 좋은 조건을 유지하고 있었을 것으로 유추가 가능하다. 또, 민물에서 자란 뱀장어 보다 하구에 서식한 뱀장어의 성장률이 빠른 것으로 보고되었고(Jessop et al., 2004; Walsh et al., 2006), 본 연구에서도 river type 뱀장어에 비하여 estuary type 뱀장어의 성장률이 빨라(Table 1-9) 하구역 뱀장어의 성장이 빨라 암컷이 우점하였을 가능성도 있다. 또한 하구역에서 실뱀장어기와 초기 성장기를 지낸 뱀장어들은 암컷으로 성분화 되는 경향이 있어(Han and Tzeng, 2007) 약 70%정도가하구역 서식처 유형을 나타낸 금강하구의 뱀장어들은 암컷으로 성장하였을 것으로 추정할 수 있다. 그러나 하구둑의 영향으로 뱀장어 이동 통로가 제한 된 것이 뱀장어 암수 결정에 어떤 역할을 하였는지에 대하여는 앞으로 구체적인 연구가 요구된다.

3) 연령조성

뱀장어의 연령사정은 관찰자의 숙련도에 따라 오차가 발생하는 경우가 많다(Moriarty, 1983; Svedäng et al., 1998). 다양한 방법을 통해 뱀장어속 어류의 이석을 전처리하여 연륜을 판독한 결과에서 본 연구에서 사용한 시상면(sagittal plane)을 지나는 이석의 단면을 만들어 관찰하는 방법이 가장 신뢰도가 높은 것으로 보고되었다(Vøllestad et al., 1988). 본 연구에서는 시상면을 중심으로 양면을 연마하였고, 투명대와 불투명대 및 불투명대의 성장정시선이 비교적 뚜렷하여 이석을 관찰한 모든 개체의 연령을 판독할 수 있어 연령에 대한 오차는 없었다. 또한 연령대의 분포가 3~17세로 넓은 것은 뱀장어 각 개체가 서식환경조건이나 먹이 조건 등의 편차가 커서 생겨날 수 있는 있는 것으로(Panfili et al., 1994), 산란회유에 참여하는 은뱀장어의 연령범위가 3~20세 인 것을 감안할 때(Aoyama and Miller, 2003), 판독된 뱀장어의 연령은 각 강하구의 뱀장어연령조성을 밝히는데 문제가 없는 것으로 판단된다.

뱀장어 이석의 연륜을 판독하여 추정된 뱀장어의 연령은 3세부터 최대 17세였다. 황뱀장어는 미성숙된 개체로 상대적으로 연령이 낮아 수컷 뱀장어는 5세, 암컷 뱀장어는 6세가 최대 연령이었고, 3-4세 황뱀장어가 64.4%를 차지하였다. 은뱀장어의 연령 범위는 수컷의 경우 4세부터 8세까지, 암컷의 경우 3세부터 17세까지였다. 10세 이상의 고연령 뱀장어는 총 9마리(4.3%)로 암컷만 소량 채집되었다. 은뱀장어는 3세군의 비율은 적은 반면 주연령군은 5-7세로 62.3%를 차지하여 황뱀장어의 주 연령군에 비해서 연령이 높았다.

금강에서 수집된 수컷 은뱀장어의 평균(\pm SD) 연령은 6.3 ± 1.4 세, 암컷 은뱀장어는 6.3 ± 2.5 로 큰 차이가 나지 않았는데, 이것은 수컷의 채집량은 적은 반면 암컷은 채집량이 많았고, 연령범위가 넓었기 때문이다. 만경강과 낙동강의 수컷 은뱀장어 평균연령은 각각 5.4 ± 0.9 세, 6.4 ± 0.8 세였고, 암컷은 뱀장어는 6.9 ± 1.5 세, 7.0 ± 1.0 세로 은뱀장어의 평균 연령은 암컷이 약 1세정도 더 많았다(Table 1-4). 이 결과는 국내 하천 및 하구에서 자라는 뱀장어는 암컷은 평균 6-7세, 수컷은 6세 정도에서 은뱀장어로 성숙하여 산란 회유를 떠나는 것으로 볼 수 있다. 동북아시아산 은뱀장어는 암컷이 수컷에 비해 평균 나이가 많았고. 유럽산 뱀장어(*A. Anguilla*), 북미산 뱀장어(*A. rostrata*), 호주산 뱀장어(*A. australis*, *A. dieffenbachia*) 등도 암컷 은뱀장어의 평균 나이가 더 많았다(Arai et al., 2004; Jessop et al., 2004; Kotake et al., 2005; Shiao et al., 2003; Tzeng et al., 2000a; Tzeng et al., 2000b) (Table 13). 뱀장어속 어류는 암컷과 수컷의 성장패턴이 달라, 수컷은 성숙기간을 최소화(time-minimizing strategy)하여 산란회유에 참여할 수 있도록 적응된 반면(Helfman et al., 1987; Oliveira, 1999) 암컷은 변태시기를 지연하여 몸의 무게를 최대한으로 늘린 상태로 산란회유에 참여할 수 있도록 적응한 것으로 보고되었다(Helfman et al., 1987; Vøllestad, 1992). 이렇게 산란회

유에 참여하는 나이가 늦어짐으로써, 암컷은 보다 많은 양의 알을 산란할 수 있게 되어 재 생산 효율을 높일 수 있다. 위에서 언급한 것처럼 암컷이 천천히 성장하여 체장(혹은 체중)을 최대로 증가시키는 size-maximizing 전략만을 선택한다면, 매년 채집된 암컷의 연령은 일정하게 나이가 많아야 하지만 본 연구에서 암컷 뱀장어는 같은 강에서 채집되었어도 연도 별로 연령 구성이 일정하지 않다. 또한 동북아시아산 은뱀장어의 평균 연령은 Table -10과 같이 암컷은 5.4~8.3세, 수컷은 4~7.3세로, 지역마다 차이가 있어 먹이나 서식환경, 유연 종과의 경쟁 등의 요인으로(Jellyman, 1997; Shiao et al., 2003) 성장에 영향을 받아 두가지 전략을 적절히 선택하여 은뱀장어로 변태하는 연령이 지역마다 다른 것으로 추정된다.

Table 1-10. Comparison of age, total length (TL) and weight (BW) in the various waters.

Area	Species	Sex	Age (range)	TL (range)	BW (range)
Geum River	<i>A. japonica</i>	F	6.3±2.5 (3-17)	65.6±6.9 (47.0-85.7)	463.7±186.1 (140-1029)
		M	7.3±1.5 (4-8)	51.9±3.5 (48.7-58.5)	180.8±29.1 (141-221)
Mangyeon River	"	F	6.9±1.8 (4-11)	62.2±8.7 (48.3-87.5)	418.5±206.5 (148-1040)
		M	5.4±0.9 (4-7)	52.2±4.9 (43.2-62.3)	231.0±76.3 (115-458)
Nakdong River	"	F	7.0±1.0 (5-9)	64.9±5.7 (52.2-81.5)	454.2±135.3 (163-909)
		M	6.4±0.8 (5-8)	58.2±4.8 (50.0-66.9)	317.8±77.4 (187-530)
Mikawa Bay, Japan ¹	"	F	7.8±1.9 (4-17)	71.7±8.1 (47.2-104.0)	587±223 (129-1685)
		M	6.9±1.7 (4-10)	54.5±6.0 (41.2-66.3)	232±81 (100-412)
Amakusa Island, Japan ²	"	F		66.9±7.2 (51.7-80.0)	447±186 (150-810)
		M		46.9±5.0 (42.4-57.0)	136±38 (92-200)
Touchien River, China ³	"	F	5.4±1.3 (3-7)	52.9±10.2 (34.7-68.7)	279.8±199.1 (62.9-711.4)
		M	7.0±0.0 (7)	60.3±2.3 (57.9-61.9)	435.7±125.8 (346.7-524.6)
Kaoping River, China ³	"	F	6.3±2.3 (5-9)	49.5±5.2 (43.3-56.2)	179.2±59.2 (121.1-259.8)
		M	4	41.7±7.8 (36.2-47.2)	133.8±83.5 (54.7-113.8)
Pearl River, China ⁴	"	F	8.3±1.6 (5-10)	61.4±4.1	
		M	6.4±1.6 (4-10)	48.3±4.5	
Baltic Sea ⁵	<i>A. anguilla</i>	F	13.2±4.3 (9-20)	80.5±10.5	1070.3±452.6 (558-1790)
		M	5	438	151
East River, Canada ⁶	<i>A. rostrata</i>	F	(11-29)	46.7±8.7 (37.8-74.0)	207.5±176.7 (92.6-882.2)
		M	(10-25)	34.4±1.8 (32.6-41.2)	78.9±10.0 (62.7-115.2)
Lake Ellesmere, New Zealand ⁷	<i>A. australis</i>	F	24.6±5.2(18-33)		
		M	17.6±5.9(13-27)		
Lake Ellesmere, New Zealand ⁷	<i>A. dieffenbachii</i>	F	41.6±9.8(19-59)		
		M	26.0±8.6(15-40)		

1) Kotake et al. (2005), 2) Kotake et al. (2003), 3) Shiao et al. (2003), 4) Tzeng et al. (2000a)
5) Tzeng et al. (2000b), 6) Jessop et al. (2004) 7) Arai et al. (2004)

4) 성장

본 연구의 금강에서 채집된 뱀장어는 암컷의 성장이 수컷에 비해 빨랐고, 만경강에서 채집된 뱀장어의 경우 암컷과 수컷의 체장 성장은 비슷하였다(Fig. 1-15). 일부 연구에서 수컷의 성장률이 암컷에 비해 빠른 결과도 있지만 (Holmgren et al., 1997; Poole and Reynolds, 1996), 유럽산, 북미산, 동북아산 뱀장어 개체군은 일반적으로 암컷의 성장률이 수컷에 비해 빠르다(Oliveira, 1999; Oliveira and McCleave, 2002; Tzeng et al., 2003). 금강 수컷 뱀장어의 비율은 비록 작지만 이론적인 최대 체장에 빠르게 성장하려는 경향이 뚜렷하게 나타나고 있다. 알려져 있는 바와 같이 수컷 뱀장어는 산란에 참여할 수 있는 시기를 최대한 앞당기려는 경향이 있어(Helfman et al., 1987; Oliveira, 1999; Vøllestad, 1992), 같은 성장률을 갖는 암컷 뱀장어에 비해 회유연령(age at migration)이 상대적으로 어리다. 빨리 성장하고, 일찍 성숙한 개체들은 산란회유에 빨리 참여하기 때문에 고연령군은 성장률이 느린 개체들로 구성되어 이석의 연륜형성시기의 체장을 역추산 할 경우 von Bertalanffy 성장식의 고연령대에서 성장곡선은 실제와 많은 차이가 날 수 있다.

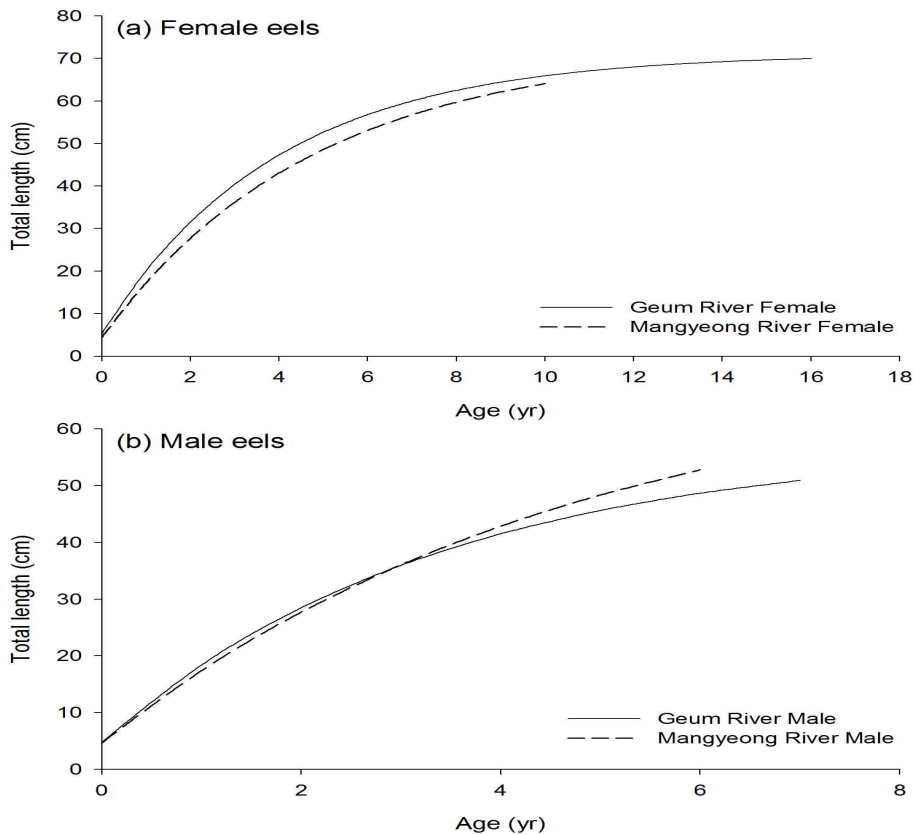


Fig. 1-15. Comparison of von Bertalanffy length growth of female (upper) and male eels (lower) collected in Geum River (solid line) and Mangyeong River (dash line).

본 연구 지역에서 수집한 뱀장어의 역추산 전장을 이용하여 연령군별 각 연령의 전장을 도시하였을 때, 어린 연령군의 역추산 전장이 나이가 많은 연령군에 비해 큰 Lee 현상(Lee's phenomenon)이 나타났다(Begenal and Tesch, 1978). 이것은 뱀장어는 서식처에서 빠르게 성장한 개체들이 느리게 성장한 개체들 보다 먼저 성숙하여 산란회유에 참여하기 위해 서식처에서 먼저 바다로 빠져나갔기 때문에, 은뱀장어는 나이가 많을수록 어릴 때 성장이 느린 개체들로 구성된 것으로 볼 수 있다. 이 Lee현상은 망목 선택에 의해 어업 대상이 되는 어류 중 저연령군에서 큰 개체만 선택적으로 어획되거나, 본 연구에서와 같이 한 연령군에서 빨리 자란 개체들이 먼저 성숙하여 외해의 서식처로 회유하여 하구나 강에 남아있는 개체들은 같은 연령군에서 느리게 성장한 개체들로 구성되었을 때 관찰되는 현상이다. 위와 같은 어린 나이군에서 선택적으로 큰 개체가 어획되거나 뱀장어와 같이 성장 속도가 빠른 어류가 먼저 산란 회유하여, 나이에 따라 성장률이 감소하는 생물에 Von Bertalanffy 성장식이 적합하다.

본 연구에서 이석 장반경과 전장은 일차 선형 관계를 보였다(Fig. 1-6). 이 관계의 회귀 직선식에 육수 연령의 기준이 되는 즉, elver mark 형성 때의 반경(r_0)인 약 150 μm 를 대입하여 체장(L_0)을 계산하면 약 16.0 cm로 계산되어 실뱀장어의 평균 길이(약 5.8 cm)와 큰 차이를 보였다. 뱀장어는 엽상 자어기 이석과 체장은 1차 비례하며 하지만, 실뱀장어로 변태기에는 체장은 자라지 않고 이석만자라는 것으로 알려져 있다(Otake et al., 1994). 그리고 치어 부유기에서 저서 성장기 사이에 이석이 체장에 비하여 빠르게 자랄 수 있다. 부유 치어기에서 저서 유어기로 바뀔 때 이석이 체장에 대하여 기하급수적으로 자라는 현상은 양볼락과 어류(Laidig et al., 1991; Lee and Kim, 2000)와 대구과 어류(Nishimura and Yamada, 1984) 등에서 보고되어 부유성인 실뱀장어가 저서성인성장기 때에 체장에 비하여 이석이 빠르게 자랐을 가능성이 크다. 이러한 이유로 다 자란 뱀장어 이석-체장 관계식에서 어린 시기 체장을 역추산하면 실제 보다 큰 값이 나온 것으로 추정된다. 이 경우 전 생활사 동안의 이석-전장 관계식을 이용하면 오차를 최소화할 수 있으나 (Schirripa, 2002), 뱀장어의 경우 이에 대한 자료가 없기 때문에, 본 연구에서는 단순한 Lea의 비례식을 이용하여 그 오차를 최소화하였다. 본 연구에서 결과에서와 같이 추정된 L_0 는 6.1 cm로 실제 실뱀장어의 전장과 가장 유사하였다.

본 연구에서는 Lea의 식을 이용하여 체장을 계산하였고, 추정된 모든 자료를 이용하였기 때문에 자료가 많은 저연령어에 가중치가 주어져 초기 성장은 잘 반영되었지만 자료 수가 적은 고연령어의 자료는 가중치가 적어 고연령어의 성장은 과소평가된 단점이 있다.

금강과 만경강 뱀장어의 von Bertalanffy 성장식을 통해 두 하구에서 뱀장어의 성장을 비교하면 금강 암컷 뱀장어가 만경강 암컷 뱀장어에 비해 초기에 성장이 빠름을 알 수 있다

(Fig. 1-15a). 그러나 수컷 뱀장어의 경우 초기에는 성장 패턴이 유사하였고, 3세를 전후하여 만경강 수컷 뱀장어의 성장이 빨라지며 지속적으로 성장하고, 금강 수컷 뱀장어는 최대길이에 도달하는 성장 패턴을 가지고 있었다(Fig. 1-15b). 본 연구와 같이 암컷과 수컷의 성장계수 K 는 모두 금강 뱀장어에서 커, 성장 초기에 빨리 자라 최대크기에 빨리 도달하므로 성장의 감소가 빠르게 나타난 것으로 판단할 수 있다.

5. 서식처 이용

동북아산 뱀장어를 이용한 이석의 미량원소분석을 통해 서식처 이용에 관해서 이미 많은 연구가 이루어져 있고(Arai et al., 2003; Kotake et al., 2003; Kotake et al., 2005; Tsukamoto and Arai, 2001; Tzeng et al., 2003; Tzeng et al., 2002), 유럽산 뱀장어(Tsukamoto et al., 1998; Tzeng et al., 2000b)와 북미산 뱀장어(Jessop et al., 2002; Jessop et al., 2004)에서도 담수 환경으로 이동하여 서식하거나, 하구 또는 바다 환경에서 서식하는 유형을 분석하였다.

과거와는 달리 뱀장어의 서식처 유형이 밝혀지면서, 뱀장어의 서식처와 회유유형에 대한 새로운 인식을 갖게 되었다(Daverat et al., 2006). 바다에서 연안으로 이동한 실뱀장어는 하천으로 소상한다고 생각해왔지만, 염분이 높은 해수환경에서 성장하는 개체들도 있으며, 주로 담수와 해수가 공존하는 기수역인 하구역에서 서식하는 비율이 다른 유형에 비해 높아(Fig. 1-13), 성장기 동안 뱀장어의 서식처가 다양함을 알 수 있다. 본 연구 결과에서 river type의비가 금강 은 뱀장어가 만경강에 비하여 유의하게 낮아(Fig. 1-13), 금강의 뱀장어들은 상류로 이동하기 위하여 금강 하구둑(어도)을 통과해야하지만 뱀장어의 이동에는 적합하지 않은 구조로 되어 있어 하천으로의 뱀장어 소상량은 매우 적은 것으로 보인다. 그럼에도 불구하고, 금강 하구에서 채집된 뱀장어에서 river type의 뱀장어가 나타난 것은 일부 뱀장어가 금강의 담수가 유입되는 하구둑 바로 밑의 민물이 지속적으로 유입되는 곳에서 서식하였을 가능성도 있다. 금강 암컷 은뱀장어의 river-estuary type의 평균 Sr/Ca 비는 $3.0 \pm 0.5 \times 10^{-3}$ 로, 만경강의 $3.6 \pm 0.8 \times 10^{-3}$ 에 비하여 낮아 어도를 통하여 대부분 뱀장어가 민물로 소상하지 못하고 초기에 하구둑 아래 민물이 지속적으로 유입되는 수역에서 단기간 성장하였을 가능성이 크다. 이 결과로 판단할 때 금강에는 하구둑에 어도가 건설되어 있지만 뱀장어의 소상에 적합하지 않아 앞으로 하구 어도에 대한 개선이 요구된다.

온대 하천은 겨울에 수온이 낮아 하천으로 소상한 뱀장어가 수온이 낮아지면 보다 수온이 높은 하구로 이동하는 경향이 있다(Tesch, 2003). 본 연구에서 river-estuary type 뱀장어는 1-2년 정도 강에서 자란 후 그 이후에는 하구에서 성장하였다. 이 결과는 하천으로 소상한 뱀장어의 일부가 수온이 낮아지는 계절에 하구로 이동한 후 다시 하천으로 올라가지

않고 하구에 정착한 것을 뜻한다.

본 연구에서와 같이 온대지역 뱀장어들은 다양한 서식환경에서 성장을 하고 있어, 뱀장어는 강이나 하천으로 소상하지 않고 하구에서 성장하는 개체들이 많음을 알 수 있다. 일본과 대만의 하구에서 뱀장어를 채집하여 서식처 유형을 구분했을 때 약 60%정도가 하구역 서식처에 해당되었는데(Tzeng et al., 2003), 화산섬으로 이루어진 환경에서 강과 하천은 대륙과 연결된 지역과 비교할 때 길이가 짧고 규모가 작을 것이다. 따라서 뱀장어들은 담수환경에서 제한된 서식환경과 먹이조건을 극복하기 위해 하구환경에서 성장하는 것으로 판단된다. 금강 하구에서 채집된 뱀장어의 하구 환경 유형 (estuary type, river-estuary type)의 비율이 70%에 달하는 것은 금강의 상류로 이동하지 못하는 서식처의 구조적인 문제가 결부되어 더 높았던 것으로 판단할 수 있다. 뱀장어의 체내 염분은 약 10.5-14 psu에 달하는데 (Tzeng et al., 2003), 이는 기수환경의 염분과 유사하다. 체내 삼투압을 조절하기 위해서는 더 많은 에너지가 필요하기 때문에(Hirai et al., 1999), 뱀장어는 기수환경에서 서식하면 담수나 염분이 더 높은 해수에서 서식하는 것보다 더 적은 에너지를 필요로 하게 되어 성장에 유리하다. 하구는 육지로부터 공급되는 영양염이 축적되어 생물생산력이 높아 해양생물과 기수생물들에게 산란장, 보육장으로 이용되는 곳이기 때문에(Day et al., 1989; Haedrich and Hall, 1976; Potter et al., 1986) 성장기에 하구에서 서식하는 것은 뱀장어에 있어서 이로운 점이 있을 것이다. 하구역에서 서식하면서 성장한 뱀장어가 담수에서 서식한 뱀장어 보다 빠른 성장률을 보유하고 있는 사실로 미루어 보아 (Jessop et al., 2004; Kotake et al., 2005) 금강과 만경강에서 하구역 환경에서 성장한 뱀장어들의 연평균 성장률은 담수 환경에서 성장한 뱀장어들의 연평균 성장률보다 높아질 수 있었을 것으로 판단된다.

2. 실험 어도에서 실뱀장어의 소상 행동

실뱀장어 소상 행동 실험을 위해서 1차 년도에 어도 모형을 제작하여 1차 실험을 수행하면서 실험 어도 설계를 변경하여 2차 년도에 완성된 실험 어도를 이용하여 실뱀장어 소상 행동을 분석하였다.

1차 년도에는 순치 실험을 수행하였고, 수돗물에 탈염소제를 섞어 중화 시킨 담수를 3일간 보관한 후 실험에 하였으나 소상률이 낮아, 2차 년도부터는 낙동강 하구둑의 위의 민물을 운반하여 실험에 이용하여 성공적으로 실험실에서 소상 행동을 분석할 수 있었다. 3차 년도에는 2차년도 실험에서 미비한 점을 보완하여 추가 실험을 수행하였다.

가. 재료 및 방법

어도에서 실뱀장어의 소상 행동을 조사하기 위해서 2008-9년 3-5월에 국립수산과학원 수산공학동 어군행동실험실에 실뱀장어가 소상하는 하구둑과 어도를 재현하는 모형하구를 제작, 설치하였다(Fig. 2-1). 수조는 전체 길이 200 cm, 높이 50 cm, 폭 85 cm이며, 어도의 상부 50 cm의 ‘담수조’에서 150 cm의 ‘해수조’로 물이 흐르게 하였다. 상부 담수조와 하부 해수조 사이에는 폭 17 cm 간격으로 다섯으로 칸을 나누어 어도경사면의 기울기와 길이 등을 독립적으로 조정할 수 있도록 하였으며, 해수조의 수위를 조정할 수 있도록 제작하였다. 해수조에는 하단에 해수가 들어오고, 담수와 섞인 기수는 상단으로 빠져나가도록 통로를 만들어 하구의 상황을 재현하였다. 해수는 바다에서 실험실로 직접 연결된 입수관을 통해 공급하였으며, 담수는 현장에서 운반하여 대형 수조에 담아 공급하였다.

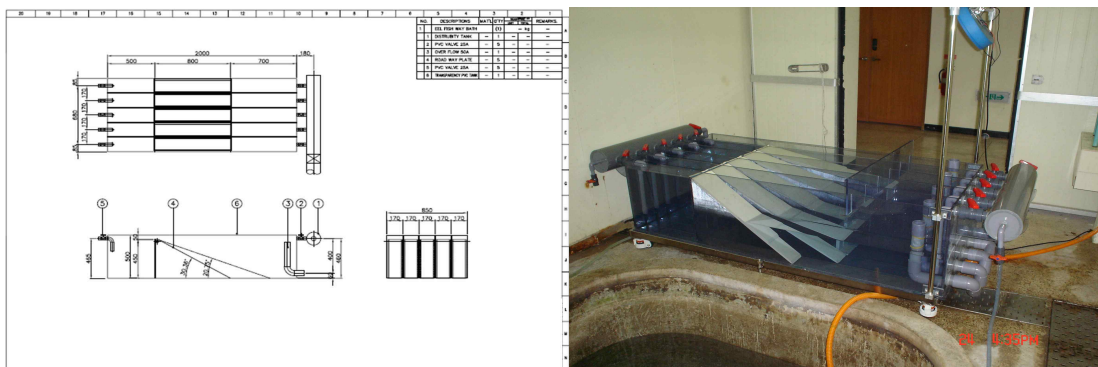


Fig. 2-1. Fish ladder used for the experiment: design drawing (left) and overview photograph (right).

염분 변화에 따른 순치 실험을 위해 낙동강 하구(20.00 psu, 5.0℃)에 채집한 실뱀장어를 부산시 기장군 앞바다의 해수(35.00 psu, 3.6℃)에 넣고 일정시간 경과 후, 염분을 높였을 때 실뱀장어 생존율을 비교하였다. 또한, 기장군 죽성 포구의 해수(33.30 psu, 14.5℃)에서 채집된 실뱀장어를 기수(22.20 psu, 14.5℃)에서 일정시간 경과 후, 염분을 낮추었을 때 실뱀장어 생존율을 비교하였다. 온도 변화에 따른 순치 여부를 파악하기 위해 22℃ 기수와 16.7℃ 기수에서 일정시간 경과 후, 실뱀장어 생존율을 비교하였다. 주광성 여부를 파악하기 위해 불빛에 대한 반응과 주야 활동성을 관찰하였다.

최적 소상 어도 조건을 추정하기 위한 실험에 이용된 실뱀장어는 낙동강 하구에서 채집하여 실험 전 충분히 실험실 수조에서 적응시켰으며, 낙동강 물은 하구둑 위의 물을 사용하였다. 해수조에 실뱀장어를 두고 담수조의 담수를 해수조로 흐르게 하며 월령, 낮과 밤, 조석주기, 어도 경사도와 경사면길이, 바닥 재질, 유속, 담수 종류 등에 따라 소상하는 실뱀장어의 개체수를 계수하였다(Table 2-1). 실험 실뱀장어는 1회에 50마리씩 사용하였으며, 실험 후 실뱀장어는 채집된 하구에 방류하였다. 실험시간은 1시간으로 대조 때 종료하는 것을 기준으로 하였으며, 모든 실험에서 3회 반복 실험하였다.

Table 2-1. Summary of experiments under the various factors affecting upstream migration of glass eels and the different conditions of eel-ladder in order to design the glass eel pass. Each experiment was replicated by three times for 1 hour before high tide

Factors		Experimental conditions					
Moon phase	spring tide neap tide	day, night	flood tide	carpet bed	length 20 cm	velocity 0.4 cm/sec	among gradients
Tidal cycle	ebb tide flood tide	spring tide	carpet bed	length 20cm	velocity 0.4 cm/sec	among gradients	
Day & night	day night	neap tide, spring tide	flood tide	carpet bed	length 20cm	velocity 0.4 cm/sec	among gradients
Ladder gradient	10°, 20°, 30°, 40°, 50°	spring tide, neap tide	day, night	flood tide	carpet bed	length 20cm	velocity 0.4 cm/sec
Ladder length	10, 20, 30, 40, 50 cm	spring tide	day, night	flood tide	carpet bed	gradient 30°	velocity 0.4 cm/sec
Ladder bed	gravel brush sandpaper carpet PVC	spring tide	day	flood tide	length 20cm	gradient 30°	velocity 0.4 cm/sec
Velocity of water flow	0.3 cm/sec 0.4 cm/sec 0.5 cm/sec 0.6 cm/sec 0.7 cm/sec	neap tide	day	flood tide	carpet bed	length 20cm	gradient 30°
Character of freshwater	river tap reservoir	neap tide	day	carpet bed	length 20cm	gradient 30°	velocity 0.4 cm/sec

월령(대조기, 소조기)간 비교를 위해 낮과 밤의 밀물 때에 카펫 바닥, 어도길이 20cm, 유속 0.4 cm/sec에서 경사도(10°, 20°, 30°, 40°, 50°)별로 실뱀장어 소상 개체수의 차이를 파악하였다. 낮과 밤에 따른 소상량 비교를 위해 대조기와 소조기의 밀물 때에 어도길이 20cm, 카펫 바닥, 유속 0.4 cm/sec에서 경사도(10°, 20°, 30°, 40°, 50°)별 소상 개체수를 계수하였다. 대조기에 어도길이 20 cm, 카펫 바닥, 유속 0.4 cm/sec, 경사도(10°, 20°, 30°, 40°, 50°)별로 조석주기(썰물, 밀물)간 실뱀장어 소상량 차이를 분석하였다. 경사도(10°, 20°, 30°, 40°, 50°)간 최적 어도 각도를 구하기 위해 대조기와 소조기의 낮과 밤의 밀물 때에 어도길이 20 cm, 카펫 바닥, 유속 0.4 cm/sec에서 각 개체수를 계수하여 비교하였다. 어도길이(10, 20, 30, 40, 50 cm)간 비교는 대조기에 낮과 밤의 밀물 때에 어도 경사도 30°, 카펫 바닥, 유속 0.4 cm/sec 조건에서 실험하였다. 최적 유속(0.3, 0.4, 0.5 cm/sec, 0.6, 0.7 cm/sec)을 구하기 위해서는 소조기, 낮, 밀물 때에 어도길이 20 cm, 경사도 30°, 카펫 바닥에서 실뱀장어 소상량을 비교하였다. 어도의 바닥 재질(자갈, 솔, 사포, 카펫, PVC)간 소상 개체수 비교는 대조기, 낮, 밀물 때에 어도길이 20 cm, 경사도 30°, 유속 0.4 cm/sec의 조건에서 적정 재질을 구하는 실험을 수행하였다.

소조기와 대조기, 낮과 밤에 따른 소상량을 비교하기 위해 평균 소상량을 t-test하여 차이를 검증하였다. 경사도(10°, 20°, 30°, 40°, 50°)간, 경사면길이(10, 20, 30, 40, 50 cm)간, 유속(0.3, 0.4, 0.5 cm/sec, 0.6, 0.7 cm/sec)간, 바닥재질(자갈, 솔, 사포, 카펫, PVC)간, 조석주기(썰물/밀물)간, 그리고 물의 종류(낙동강물, 수돗물, 저수지물)간 비교를 위해 분산분석(ANOVA)을 하였다. ANOVA 분석 결과 차이가 있을 경우, 어떤 항목간 차이가 있는지를 파악하기 위하여 다중비교(multiple comparison)를 하였다. 통계분석은 SAS(1989)를 이용하여 처리하였다.

나. 결과

1) 순치 실험

낙동강 하구(20 psu, 14.0°C)에서 채집된 실뱀장어를 염분(35 psu, 13.6°C)을 높여 18-24 hr 동안 순치시켰을 때, 생존률이 54%이었다. 죽성 포구(33 psu, 14°C)에서 채집된 실뱀장어를 염분(22 psu, 14.5°C)을 낮추어 18-24 hr 동안 순치시켰을 때, 사망률이 0%로 염분을 높이면 일부 사망하였으나 낮추었을 경우 모두 생존하였다(Table 2-2). 또한, 같은 염분(22 psu)에서 수온 22.0°C에서 16.7°C로 낮추면, 37%가 사망하였다.

Table 2-2. Results of taming of glass eels according to change of salinity and water temperature

Experimental conditions	Initial condition (No. of inds.)	Taming condition	Survival rate in 18-24 hrs
Change of salinity	20 psu, 14.0°C (n=100)	35 psu, 13.6°C	54%
Change of salinity	33 psu, 14.5°C (n=50)	22 psu, 14.5°C	100%
Change of water temperature	22 psu, 22.0°C (n=200)	22 psu, 16.7°C	63%

2) 소상 요인에 따른 소상량

가) 주광성 실험

랜턴 불빛을 비추었을 때 불빛을 피하였고, 낮에는 은폐물에 숨어 있었으며 밤에는 왕성한 활동이 관찰되었다(Table 2-3).

Table 2-3. Results of response of glass eels according to change of lighting and day-night periods

Lighting		Activity	
Turn off	Turn on	Day	Night
normal	avoid	shrink	vital

나) 담수의 종류에 따른 소상 개체수 비교

담수의 종류(낙동강물, 수돗물, 저수지물)에 따라 소상한 실뱀장어 개체수를 비교였다. 수돗물은 가정용 수조에서 수돗물을 중화 시키기 위하여 이용하는 탈불소제를 섞은 후 2-3일 후에 사용하였다. 각 담수 종류에 따라 50 마리 중 낙동강물에는 8.33 마리, 저수지물에는 2.67 마리가 소상하였으나, 탈불소 시킨 수돗물에서는 소상하지 않았으며(Fig. 2-2), 이들간 유의한 차이가 있었다($p < 0.05$) (Table 2-4). Duncan의 다중비교 결과, 저수지물과 수돗물에 비해 낙동강물로 소상이 많은 것으로 나타났다(Table 2-4). 따라서 이후 실험에서는 담수는 낙동강 물을 사용하였다.

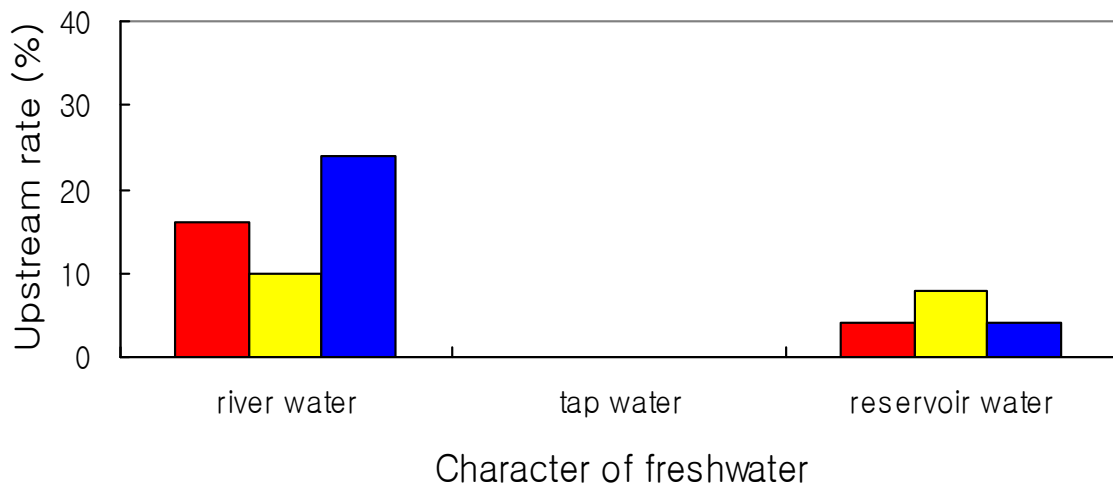


Fig. 2-2. Variation in upstream rate of glass eels according to character of freshwater (river water, tap water and reservoir water). Each vertical bar indicates three replicated attempts.

Table 2-4. Result of ANOVA to compare the average number of individuals of glass eels moved up through the slope according to the freshwater (river water, tap water and reservoir water)

Type of water	Estuarine water			Tap water			Reservoir water		
	N	MEAN	STD	N	MEAN	STD	N	MEAN	STD
	3	8.33	3.51	3	0.00	0.00	3	2.67	1.15

Source	DF	SS	MS	F	Pr > F
Type of water	2	108.67	54.33	11.93	0.0081
Error	6	27.33	4.56		

Duncan Grouping	Mean	N	Type of water
A	8.333	3	Estuarine
B	2.667	3	Reservoir
B	0.000	3	Tap

Means with the same letter are not significantly different.

다) 월령에 따른 소상 개체수 비교

월령(소조기, 대조기)에 따라 소상한 실뱀장어량 차이를 비교한 결과, 소조기에 매 1시간 동안 30 마리 중 평균 3.33 마리가 소상하였고, 대조기에는 6.33 마리가 소상하였으며(Fig. 2-3), 대조기에 유의하게 소상량이 많았다($p < 0.05$) (Table 2-5).

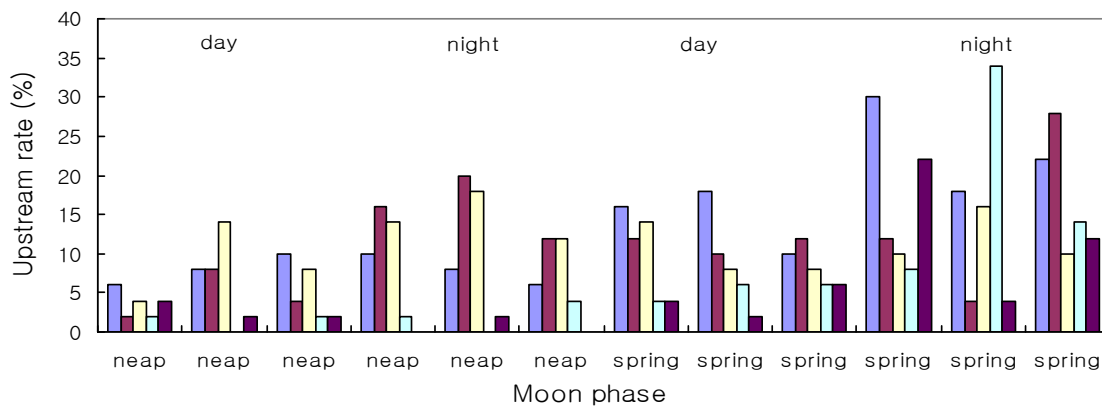


Fig. 2-3. Variation in upstream rate of glass eels according to moon phases (spring and neap tides). Each vertical bar indicates ladder gradients (10°, 20°, 30°, 40° and 50° from the left to the right).

Table 2-5. Result of t-test to compare the average number of individuals of glass eels moved up through the slope according to moon phase (spring and neap tides)

Moon	Half moon			Null moon		
	N	MEAN	STD	N	MEAN	STD
	30	3.33	2.85	30	6.33	4.03

	Leven's equal variance test		DF	t	Pr > t
	F	Pr > F			
Variance Equal	2	0.0674	58.0	-3.32	0.0015
Unequal			52.2	-3.32	0.0016

라) 조석 주기에 따른 소상 개체수 비교

조석 시간(썰물, 밀물)에 따라 소상한 실뱀장어 개체수를 비교하였다. 썰물 시기와 밀물 시기 동안에 통계적으로 유의한 차이는 없었다(Table 2-6). 그러나 조위에 따라 고조위, 중조위, 저조위로 나누었을 때는 50 마리 중 고조위 때 15 마리, 중조위 때 8.83 마리, 저조위 때 7.67 마리가 소상하여(Fig. 2-4), 소상량 차이가 유의하였다($p < 0.05$). Duncan의 다중비교 결과, 고조위 때는 중조위, 저조위 때보다 소상량이 많았다(Table 2-6).

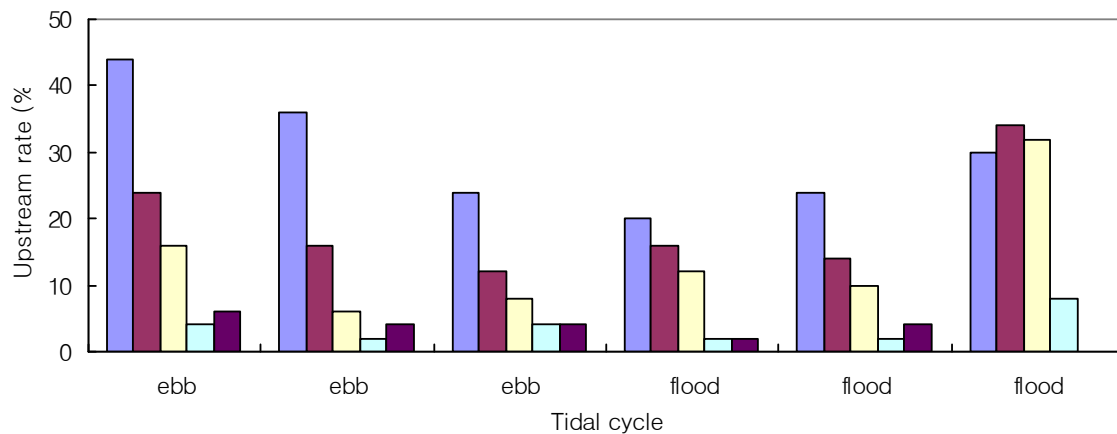


Fig. 2-4. Variation in upstream rate of glass eels according to tidal cycles (ebb and flood tides). Each vertical bar indicates ladder gradients (10°, 20°, 30°, 40° and 50° from the left to the right).

Table 2-6. Result of ANOVA to compare the average number of individuals of glass eels moved up through the slope according to tidal cycles (ebb and flood tides) on each tidal time (upper) and three tidal levels (high, middle and low tide)

Tide	Tide1			Tide2			Tide3			Tide4			Tide5			Tide6		
	N	MEAN	STD	N	MEAN	STD	N	MEAN	STD	N	MEAN	STD	N	MEAN	STD	N	MEAN	STD
	5	9.40	8.11	5	6.40	7.02	5	5.20	4.15	5	5.20	4.08	5	5.54	4.39	5	10.40	7.83

Source	DF	SS	MS	F	Pr > F
Tide	5	133.60	26.72	0.70	0.6300
Error	24	918.40	38.27		

Duncan Grouping	Mean	N	Tide
A	10.400	5	Tide6
A			
A	9.400	5	Tide1
A			
A	6.400	5	Tide2
A			
A	5.400	5	Tide5
A			
A	5.200	5	Tide3
A			
A	5.200	5	Tide4

Tidal level	High			Middle			Low		
	N	MEAN	STD	N	MEAN	STD	N	MEAN	STD
	6	15.00	4.73	6	8.83	5.42	6	7.67	2.94

Source	DF	SS	MS	F	Pr > F
Time	2	186.30	93.17	4.62	0.0272
Error	15	302.17	20.14		

Duncan Grouping	Mean	N	Tidal level
A	15	6	High
B	8.833	6	Middle
B			
B	7.667	6	Low

마) 낮과 밤에 따른 소상 개체수 비교

낮과 밤에 따라 소상한 개체수 차이를 비교하였을 때, 낮에 30 마리 중 평균 3.53 마리가 소상하였고 밤에는 6.13 마리가 소상하였으며(Fig. 2-5), 밤에 유의하게 많은 실뱀장어가 소상하였다($p < 0.05$) (Table 2-7).

Table 2-7. Result of t-test to compare the average number of individuals of glass eels moved up through the slope according to day and night periods

Day-Night	Day			Night		
	N	MEAN	STD	N	MEAN	STD
	30	3.53	2.33	30	6.13	4.49

	Leven's equal variance test		DF	t	Pr > t
	F	Pr > F			
Variance Equal	3.72	0.0007	58	-2.81	0.0067
Unequal			43.5	-2.81	0.0073

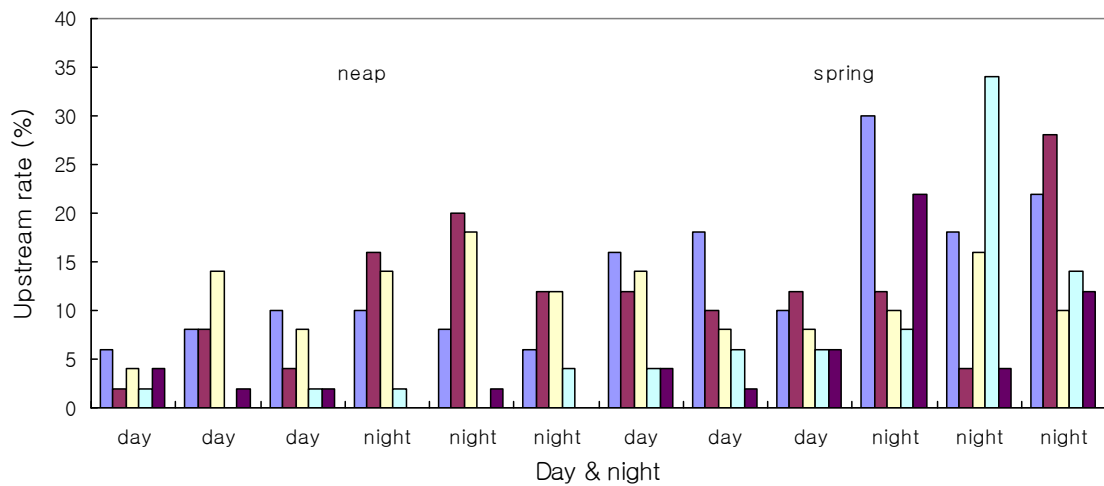


Fig. 2-5. Variation in upstream rate of glass eels according to day and night periods. Each vertical bar indicates ladder gradients (10°, 20°, 30°, 40° and 50° from the left to the right).

2) 어도 조건에 따른 소상량

가) 어도 경사도에 따른 소상 개체수 비교

어도 경사도(10°, 20°, 30°, 40°, 50°)별 소상한 실뱀장어 소상량 차이를 비교한 결과, 10°에서 50 마리 중 평균 6.75 마리가 소상하였고, 20°, 30°, 40°, 50°에 각각 5.83 마리, 5.67 마리, 3.42 마리, 2.50 마리가 소상하였으며(Fig. 2-6), 이들간 유의한 차이가 있었다($p < 0.05$) (Table 2-8). Duncan의 다중비교 하였을 때, 10, 20, 30° 때에 40, 50°보다 유의하게 많은 개체가 소상하였다.

Table 2-8. Result of ANOVA to compare the average number of individuals of glass eels moved up through the slope according to ladder gradients (10°, 20°, 30°, 40°, and 50°)

Degree	10°C			20°C			30°C			40°C			50°C		
	N	MEAN	STD	N	MEAN	STD	N	MEAN	STD	N	MEAN	STD	N	MEAN	STD
	12	6.75	3.70	12	5.83	3.64	12	5.67	2.02	12	3.42	4.70	12	2.50	3.12

Source	DF	SS	MS	F	Pr > F
Degree	4	153.83	38.46	3.06	0.0238
Error	55	690.50	12.55		

Duncan Grouping	Mean	N	Degree
A	6.750	12	10
A			
B	5.833	12	20
B			
B	5.667	12	30
B			
B	3.417	12	40
C			
C	2.500	12	50

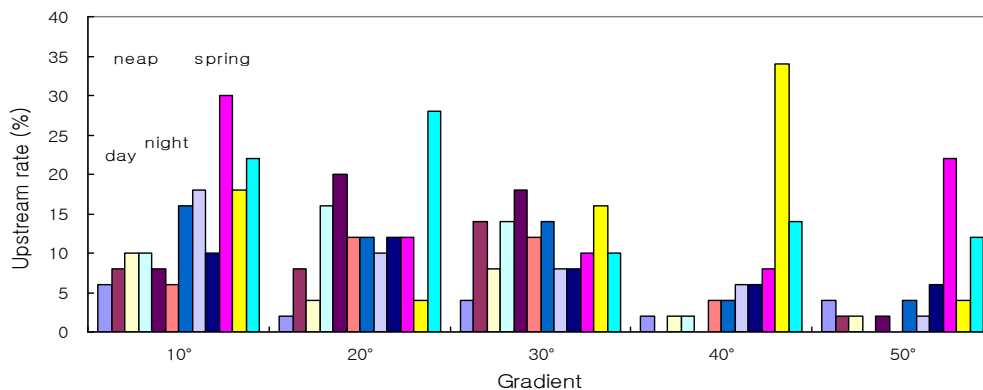


Fig. 2-6. Variation in upstream rate of glass eels according to ladder gradients (10°, 20°, 30°, 40° and 50°). Each vertical bar indicates day and night at neap tide and spring tide from the left to the right), respectively.

나) 어도 경사면 길이에 따른 소상 개체수 비교

어도 경사도 30°에서 길이(10, 20, 30, 40, 50 cm)별 소상한 실뱀장어 개체수를 비교한 결과, 10 cm에서 50 마리 중 평균 40.50 마리가 소상하였고, 20 cm, 30 cm, 40 cm, 50 cm에서 각각 26.50 마리, 20.83 마리, 15.33 마리, 12.50 마리가 소상하였으며(Fig. 2-7), 경사면이 길어짐에 따라 소상 개체수가 유의하게 감소하였다($p < 0.05$) (Table 2-8). Duncan의 다중비교 결과, 10 cm와 20, 30, 40, 50 cm간 차이가 있는 것으로 나타났다(Table 2-9).

Table 2-8. Result of ANOVA to compare the average number of individuals of glass eels moved up through the slope according to ladder gradients (10°, 20°, 30°, 40°, and 50°)

Degree	10°			20°			30°			40°			50°		
	N	MEAN	STD	N	MEAN	STD	N	MEAN	STD	N	MEAN	STD	N	MEAN	STD
	12	6.75	3.70	12	5.83	3.64	12	5.67	2.02	12	3.42	4.70	12	2.50	3.12

Source	DF	SS	MS	F	Pr > F
Degree	4	153.83	38.46	3.06	0.0238
Error	55	690.50	12.55		

Duncan Grouping	Mean	N	Degree
A	6.750	12	10
A			
B A	5.833	12	20
B A			
B A	5.667	12	30
B			
B C	3.417	12	40
C			
C	2.500	12	50

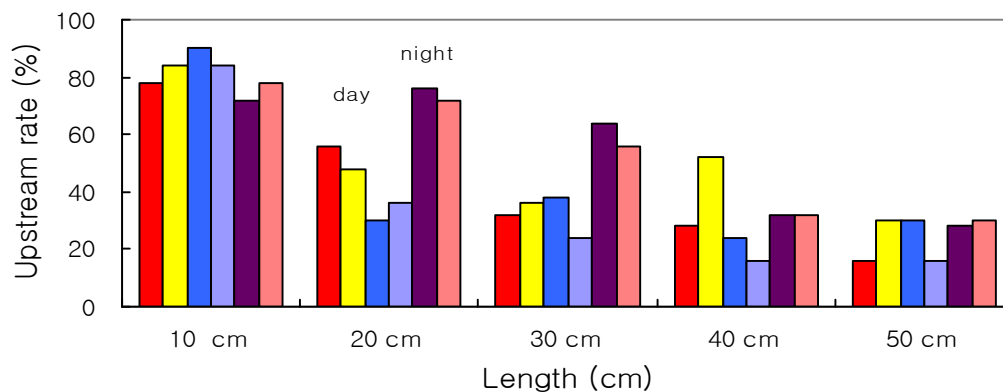


Fig. 2-7. Variation in upstream rate of glass eels according to slope lengths (10, 20, 30, 40 and 50 cm from the left to the right). Vertical bar indicates the rate during the day (left 3) and the night).

다) 어도 바닥 재질에 따른 소상 개체수 비교

어도 바닥 재질(자갈, 솔, 사포, 카펫, PVC)별 소상한 실뱀장어의 개체수를 비교하였을 때, 자갈 바닥에서는 50 마리 중 12.33 마리, 솔에서는 12.67 마리, 카펫에서는 7.67 마리, 사포에서는 0.88 마리가 소상하였으나, PVC 바닥에서는 소상하지 않았으며(Fig. 2-8), 이들간 유의한 차이가 있었다($p < 0.05$) (Table 2-10). Duncan의 다중비교 결과, 솔, 자갈, 카펫 바닥과 사포, PVC바닥은 서로 다른 그룹으로 나뉘어졌다.

Table 2-10. Result of ANOVA to compare the average number of individuals of glass eels moved up through the slope according to sloe bottom (gravel, brush, sandpaper, carpet and PVC)

Stratum	Gravel			Brush			Sandpaper			Carpet			PVC		
	N	MEAN	STD	N	MEAN	STD	N	MEAN	STD	N	MEAN	STD	N	MEAN	STD
	3	12.33	3.21	3	12.67	10.02	3	0.33	0.58	3	7.67	6.66	3	0.00	0.00

Source	DF	SS	MS	F	Pr > F
Stratum	4	460.93	115.23	3.71	< 0.0422
Error	10	310.67	31.07		

Duncan Grouping	Mean	N	Stratum
A	12.667	3	Brush
A			
A	12.333	3	Gravel
A			
B	7.667	3	Carpet
B			
B	0.333	3	Sand paper
B			
B	0.000	3	PVC

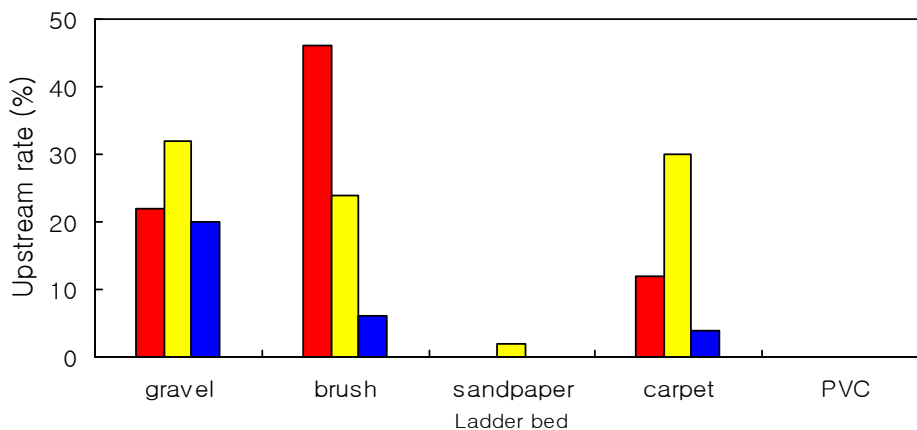


Fig. 2-8. Variation in upstream rate of glass eels according to slope bottom materials (gravel, brush, sandpaper, carpet and PVC). Each vertical bar indicates three replicated attempts.

라) 유속에 따른 소상 개체수 비교

어도에 흐르는 담수의 유속(0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 cm/sec)에 따른 실험장어 소상량을 비교한 결과, 0.3 cm/sec, 0.4 cm/sec, 0.5 cm/sec 에서 50 마리 중 각각 평균 1 마리, 1.33 마리, 1.33 마리가 소상하였고, 0.6 cm/sec, 0.7 cm/sec에서는 소상하지 않았으며(Fig. 2-9), 이들간 유의한 차이가 있었다($p < 0.05$) (Table 2-11). Duncan의 다중비교 결과, 0.3, 0.4 cm/sec와 0.5, 0.6, 0.7cm/sec간 차이가 있는 것으로 나타났다.

Table 2-11. Result of ANOVA to compare the average number of individuals of glass eels moved up through the slope according to velocity of water flow

Velocity	0.3cm/sec			0.4cm/sec			0.5cm/sec			0.6cm/sec			0.7cm/sec		
	N	MEAN	STD	N	MEAN	STD	N	MEAN	STD	N	MEAN	STD	N	MEAN	STD
	3	1.00	0.00	3	1.33	0.58	3	1.33	0.58	3	0.00	0.00	3	0.00	0.00

Source	DF	SS	MS	F	Pr > F
Velocity	4	4.40	1.10	8.25	< .0033
Error	10	1.33	0.13		

Duncan Grouping	Mean	N	Velocity
A	1.3333	3	0.4
A			
A	1.0000	3	0.3
B	0.3333	3	0.5
B			
B	0.0000	3	0.6
B			
B	0.0000	3	0.7

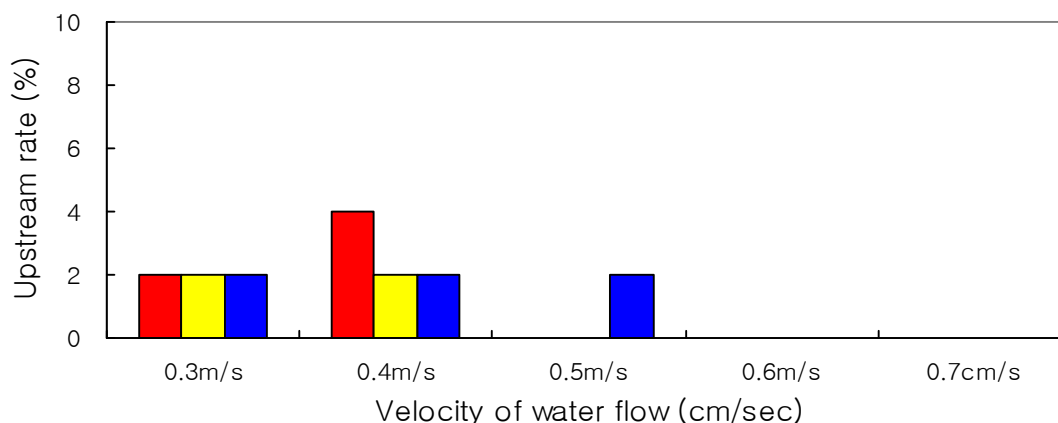


Fig. 2-9. Variation in upstream rate of glass eels according to velocity of water flow (0.3, 0.4, 0.5, 0.6 and 0.7 cm/sec). Each vertical bar indicates three replicated attempts.

다. 고 찰

왕복성 어류는 오랜 진화 과정을 통하여 산란, 서식처 이용 또는 피·포식의 경쟁 등의 이유로 강과 바다를 왕래하는 것으로 알려져 있다. 뱀장어는 치어기를 바다에서 보내고 실뱀장어가 하구를 통해 강으로 회유한다. 이때는 고염에서 저염으로 서식처 이동을 하는 시기로 이에 적응하는 삼투압 조절이 진행되고 있을 것이다. 그러나 역으로 저염에서 고염으로 서식환경이 바뀌었을 때는 생존하기 어려운 것으로 나타났다(Table 2-2). 또한, 실뱀장어가 하구 소상하는 시기는 연중 수온이 낮은 시기로(이, 2003), 이후 수온의 상승에 적응하는 중이므로 갑자기 수온을 낮추었을 때 사망하여 실뱀장어가 수온 변화에도 생리적으로 민감하게 반응하였다(Kim *et al.*, 2002). 따라서, 실뱀장어가 생활사 진행에 역행하는 환경 변화에는 순치하기 어려운 것으로 판단된다.

국내 어도는 대부분 유영력이 강한 어류를 대상으로 설계되어 있어(황, 2000, 2003), 유영력이 약한 왕복성 어류의 이동이 차단되어 독을 중심으로 해수역과 담수역의 어류 종조성이 다르게 나타나는 등 어도의 제 기능을 다 하지 못하고 있다(양 등, 2001). 그러나 이와 달리 뱀장어의 생태과 행동 특성을 고려하여 어도를 설치하였을 때, 시간이 지남에 따라 생물량이 증가하였다(Fontenelle *et al.*, 2001; Briand *et al.*, 2005). 따라서 실뱀장어 최적 소상을 위해 국내 하구 생태에 맞는 적정 어도 개발이 절실하다. 적정 어도 조건을 찾아내기 위한 모형어도실험에서 실험 조건이 달라 소상량의 절대값은 차이가 있을 수 있어 같은 조건에서 상대값으로 비교하였다.

실뱀장어는 조석주기가 생체리듬으로 내재되어 있어(Kim *et al.*, 2002, 2006), 대조기와 고조위에서 활동성이 강해 어도 소상에도 유리한 것으로 판단된다(Table 2-6). 실뱀장어는 불을 비추었을 때 불빛을 피하였고 낮에는 은폐물에 숨어 있었으며 밤에는 왕성한 활동이 관찰되었고(Table 2-4), 낮보다 밤에 소상량이 많아(Fig. 2-4), 음성주광성임을 알 수 있었다.

실뱀장어 소상에 가장 중요한 어도 조건은 어도 경사면에 흐르는 물의 유속이다(Fig. 2-8; Table 2-11). 유속을 최대한 줄이기 위해서는 강한 물의 흐름을 밖으로 빼는 수로를 만들어 최소 유속을 유지하는 것이 관건이다. 실뱀장어는 기어오르는 행동을 보임으로써 미끄러운 어도 바닥은 소상에 불리하다(Fig. 2-8; Table 2-10). 따라서 솔, 자갈, 카펫과 같이 거친 재질의 바닥이 흘러 내려오는 물의 유속을 감소시키고 실뱀장어가 미끄러지지 않게 할 수 있어 소상에 유리한 것으로 판단된다. 특히, 솔은 물이 흘러 내려올 때 실뱀장어가 휩쓸리지 않게 지지할 수 있게 함으로써 가장 적당한 바닥 소재로 판단된다. 어도 경사 각도는 완만할수록 좋는데(Fig. 2-6; Table 2-8), 이럴 경우 어도의 길이가 길어지는 단점이 있다. 그런데 어도의 길이는 짧을수록 좋으나(Fig. 2-7; Table 2-9), 소상하는 시간이 길어지면 어도 길이와는 무관한 것으로 판단된다. 일직선의 어도 경사면이 길 경우, 유량이 많아지거나 유속이 세지면 휩쓸릴 수가 있고 공기에 장기간 노출 될 경우 마르거나 조류의 표적이 될 수 있어 갈지자형으로 구부리고 방향이 전환 되는 곳에 못을 만들고 위를 덮어 건조를 막고 포식자로부터 보호할 수 있을 것으로 판단된다. 본 실험 결과를 종합하면 실뱀장어는 대조

기 고조위에 가까운 썰물 때 주로 소상하며, 실뱀장어가 효과적으로 소상할 수 있는 어도는 경사면이 30도 이하로 경사면을 흐르는 수량이 적고 유속은 0.4 cm/sec 이하로, 바닥에는 실뱀장어가 기어오르며 썰 수 있는 솔이나 잔자갈들을 설치하였을 때 효과적으로 소상할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 시험 어도 설계 및 현장 실험

위의 실험 어도에서의 어도 설계 및 재질에 따른 실뱀장어 소상 행동을 고려하여 2차 년도와 3차년도에 시험 어도를 제작하여 천제연 하구의 보에 설치하여 관찰하면서 설계를 보완하였다.

(보안 관계로 이하 그림 삭제)

가. 카피트 바닥 이동식 어도 실험 (2008년)

천제연 하구 보에는 폭이 약 1020 mm로, 2008년 2월에는 단면 폭 420 mm의 20도 경사면과 600 mm의 평면에 길이 2800 mm인 카피트 바닥을 깔 이동식 시험 어도를 제작하여 현장에 설치 관찰하였다(Fig. 3-1). 어도의 구체적 설계(Fig. 3-2)와 제작 및 설치는 (주)ETMS에 의뢰하였다.

그러나 이 이동식 어도는 설치하였을 때 고정하기가 힘들고 고정하여도 수로의 바닥이 불규칙하여 담수가 어도를 따라 흐르는 양이 적었고, 수로 밖으로의 길이가 짧아 큰 파도가 칠 때 흔들리는 단점이 있었다.

나. 보의 수로를 확대한 어도 설치 (2008-9년)

2차 년도까지의 실험실 어도에서의 실뱀장어 소상 행동 결과와 1차 현장 실험 결과를 바탕으로 서귀포시와 협의, 천제연 보의 수로를 1500 mm로 확장하고 경사를 30도 정도로 완만하게 한 후 수로의 500 mm 정도에 본 연구에서 제시된 이중 경사 뱀장어 어도 설치를 협의하여 시공하기로 하였다. 시공 예정사인 (주)태웅종합 담당자와 구체적인 설계도면 작성을 의뢰하였다(Fig. 3-3).

그러나 천제연 하구 보의 변경 사업은 천제연 보 내부 준설 및 일부 도로 건설 사업과 같이 수행할 계획이었으나, 주민들의 준설 및 도로 건설 반대로 무산되었다.

다. 보강된 시험 어도 설치 (2009년)

2차 년도에 제작한 이동식 시험 어도의 문제점을 보완하여, 어도 길이는 보의 수로에 수평으로 2800 mm와 경사면이 3000 mm였고, 폭은 900 mm 중 600 mm는 약 20도 경사면을 만들고 5 cm 간격으로 5 cm 높이의 솔을 설치하였고 나머지 부분은 계단식으로 설계하였다(Fig. 3-4). 이 고정식 시험 어도를 (주)ETMS에 제작 및 설치 의뢰하여 2009년 2월에 현장에 설치하였고 문제점을 3월에 1차보완 수리하였다(Fig 3-5).

2009년에는 실뱀장어가 소상 초기인 1월에만 주로 소상하고, 2월 이후는 소상량이 적어, 시험 어도 설치 보완 후 3월과 4월에 정량 채집을 수행하였으나 소상량이 매우 적었다. 그러나 실뱀장어들이 경사면을 따라 소상하는 것들은 관찰되었다(Fig. 3-6).

시험 어도 설치 후 수 차례의 폭우 때 어도가 설치된 보로 홍수 범람이 수차례 있었으나 시험 어도에는 문제가 없었다. 그리고 경사면의 솔 사이에 실뱀장어들이 기어오르기 쉬울 수 있는 이끼가 자라고 있었다. 2009년 12월 본 과제가 종료되고 제주 자치도의 시험 조업 허가도 12월로 종료되어, 시험 조업 기간을 연장하고 다른 재원을 확보하여 2010년 실뱀장어 소상시기인 1-3월 추가의 소상 효과 분석을 계획하고 있다.

제 4 장 목표달성도 (%) 및 관련분야에의 기여도

1. 뱀장어의 생태 (100%)

- 성장기 뱀장어와 산란 회유 은뱀장어의 성비, 연령 및 체장 조성 및 성장 자료
 - >> 뱀장어 자원 현황 파악과 자원 회복을 위한 중요한 기초 자료로 활용
 - >> 뱀장어 양식 및 뱀장어 관련 현안 문제 해결의 자료로 활용 가능

- 뱀장어의 성장기 동안의 서식처 이용
 - >> LAICPMS를 이용한 이석 미량 원소 분석 방법은 국내에서 처음으로 시도되어 신뢰도 높은 분석 자료 도출이 가능하여 앞으로 이 분야 연구에 활용 가능
 - >> Sr/Ca 분석 결과 하구둑이 건설된 강에서 뱀장어의 하천 소상이 어려운 것으로 밝혀져 앞으로 하구의 생태 어도 변경 근거 자료로 활용.

2. 뱀장어의 소상행동 (100%)

- 소상 환경 조건에 따른 실뱀장어의 소상률 자료
 - >> 실뱀장어 소상자료 분석에 기초 자료로 활용
 - >> 하구 어도 관리 방향 제시

- 어도 조건 및 재질에 따른 실뱀장어 소상 행동
 - >> 앞으로의 뱀장어 생태 어도 설계에 활용

3. 뱀장어 생태 어도 설계 (100%)

- 뱀장어 소상 행동에 맞는 시험 어도 설치
 - >> 시험어도를 현장에 적용하였을 때 문제점 거의 보완
 - >> 시험어도는 plastic으로 제작하여 내구성이 적어 실제 적용에는 내구성이 높은 재료가 필요

- 뱀장어 생태 어도
 - >> 설계된 뱀장어 어도를 기존의 하구 어도에 적용하면 앞으로 뱀장어 자원 회복에 기여
 - >> 근래에 뱀장어 방류 비용을 감안하면 그 비용으로 뱀장어 어도를 설치할 때 자원량 증가에 크게 기여 가능

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

1. 활용 전망

- 성장기 뱀장어와 산란 회유 은뱀장어의 성비, 연령 및 체장 조성 및 성장을 국내 하천에서 처음으로 밝힘
 - 뱀장어는 동아시아 4개국(한국, 일본, 중국과 대만)의 중요한 수산 자원으로, 매년 뱀장어 전문학자와 관련업계인들이 동아시아 뱀장어 자원위원회를 개최하여, 가가 국의 연구 및 산업 정보를 교환하고 앞으로의 자원 관리 방향을 논의함. 금년(2009년)에는 동경대 해양연구소에서 11월에 회의를 개최하여 4개국의 100여명이 모여 앞으로의 자원 관리 방향을 논의하였음
 - 뱀장어는 위 4개국의 국제 자원으로 4개국 협동의 자원 관리가 요구되며, 이 자료는 앞으로 타국에서 크게 활용될 것으로 판단됨,

- 뱀장어의 소상행동 자료
 - 본 연구의 실험실 시험 어도에서 도출된 실뱀장어 소상행동 자료는 본 연구의 뱀장어 생태 어도 설계에 이용되었으며, 앞으로 하구의 특성에 따라 뱀장어 어도를 설계 설치할 때 이 자료의 활용이 가능함

- 뱀장어의 어도 설계안
 - 시험 어도르 설치하여 현장에서 문제점을 해결하였으며, 다른 재원을 확보하여 다음 실뱀장어 소상 시기에 정량적 자료 수집 분석을 계획 중임.
 - 이 자료가 확보되면 특허 출원 예정임

2. 연구 성과

○ 논문 발표

- 황학빈 · 이태원 · 황선완 · 김병직. 2008. 제주 천제연 하구 소상어류의 월별 종조성. 한국어류학회지 20(3): 210-219.
- 황선도, 이태원, 황학빈, 최일수, 황선재. 2009. 실험 어도에서 실뱀장어의 소상 행동. 한국어류학회지 21(4): 262-272

○ 작성 중인 논문

Population size, recruitment and upstream migration rates of glass eels (*Anguilla japonica*) estimated by a marking experiment using vital dyes in an estuary, Jeju, Korea.

Age, growth and migratory history by analysis of Sr:Ca ratios in otoliths of eels *Anguilla japonica* in the estuaries of the mid-west Korea.

Environmental factors affecting the daily catch levels of glass eels *Anguilla japonica* in the Geum-river estuary, Korea

Age and growth of ayu *Plecoglossus altivelis altivelis* in an estuary in Jeju as indicated from daily growth increments in otoliths.

○ 국내외 학술회의 발표

- Sun-Do Hwang, Tae-Won Lee, Il-Su Choi. 2009. Environmental factors affecting the daily catch levels of glass eels (*Anguilla japonica*) in the Geum River estuary, Korea. ICES Annual Science Conference, 21-25 September 2009. Berlin Germany. p147.
- Tae-Won Lee, Sun-Do Hwang and Hak Bin Hwang. 2008. Variation of annual population size of glass eels *Anguilla japonica* by marking experiments in the estuary. 5th World Fisheries Congress. Oct 20-25 2008. Yokohama, Japan. p278.
- Tae Won Lee. 2008. Basic biological studies for management plans of eel population in the Korean estuaries. The 11th annual meeting of East Asia Eel Resources Consortium. Oct 17 2008, Yokohama, Japan.
- Tae-Won Lee, Hak Bin Hwang and Sun-Do Hwang. Dam Effect on the Migration of Eels *Anguilla japonica* in the Korean Estuaries. 'GRISAM''s EEL DAYS in RENNES'. 17-19 Jun 2008. Rennes Univeristy, France. p26.
- Sun-Do Hwang, Tae-Won Lee, Hak Bin Hwang and Il-Su Choi. 2008. Environmental factors affecting the daily catch levels of eel, *Anguilla japonica*, larvae in the Geum-river estuary, Korea. 'GRISAM''s EEL DAYS in RENNES'. 17-19 Jun 2008. Rennes Univeristy, France. p40.
- Tae Won Lee, H.B Hwang, S.D. Hwang. 2007. Population size, recruitment and upstream migration rates of glass eels (*Anguilla japonica*) estimated by a marking experiment using vital dyes in an estuary, Jeju, Korea. 31st Larval Fish Conference-American Fishery Society. 9-12 July 2007. Memorial University, Newfoundland, Canada. p58
- Hak Bin Hwang, Tae Won Lee and Sun Do Hwang. 2007. Age, growth and migratory history by analysis of Sr:Ca ratios in otoliths of eels *Anguilla japonica* in the estuaries of the mid-wester Korea. The 7th International Symposium on Marine Sciences of the Yellow Sea and East China Sea (ISMV-7). October 12-14, 2007, Incheon, Korea. p123-124.
- Sun Do Hwang, Hak Bin Hwang and Tae Won Lee. 2007. Environmental factors affecting the daily catch of glass eels *Anguilla japonica* in the Geum-River estuary, Korea. The 7th International Symposium on Marine Sciences of the Yellow Sea and East China Sea (ISMV-7). October 12-14, 2007, Incheon, Korea. p125.
- 황학빈 · 이태원. 2009. 금강, 만경강, 낙동강 뱀장어의 성비, 연령과 성장. 2009년도 한국수산

- 과학총연합회 공동학술대회 발표요지집. 2008. 11. 12. 부산 BEXCO. p177.
- 황학빈 · 이태원. 2009. 금강, 만경강 뱀장어의 서식처 이동. 2009년도 한국수산과학총연합회 공동학술대회 발표요지집. 2008. 11. 12. 부산 BEXCO. p178.
- 이태원. 2009. 뱀장어 생산량 연변동-실뱀장어 입식량을 중심으로. 2009년도 한국수산과학총연합회 공동학술대회 발표요지집. 2008. 11. 12. 부산 BEXCO. p179.
- 황선도 · 이태원 · 김진환 · 황학빈 · 황선재 · 문대연. 2008. 모형어도를 이용한 실뱀장어 소상 조건. 2008년도 한국수산과학총연합회 공동학술대회 발표요지집 2008. 11. 13. 부산 BEXCO. p195
- 이태원. 뱀장어 생태 연구동향. 2008. 2008년도 한국수산과학총연합회 공동학술대회 발표요지집 2008. 11. 13. 부산 BEXCO. p196
- 이태원 · 황학빈 · 황선완 · 황선도. 2008. 제주 천제연하구 소상어류의 월별 종조성. 2008년 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 초록집. 2008년 5월 29-30일 제주 국제 컨벤션 센터. 213p.
- Sun-Do Hwang , Tae Won Lee, Il-Su Choi. 2008. What makes eel, *Anguilla japonica*, larvae migrate upstream in river estuary? 2008년 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 초록집. 2008년 5월 29-30일 제주 국제 컨벤션센터. 187p.
- 황선도 · 이태원 · 김진환 · 황학빈 · 황선재 · 문대연. 2008. 실뱀장어용 생태 어도 설계를 위한 소상행동 연구 소개. 2008년 한국어류학회 춘계 학술발표대회 논문 요약집. 2008년 4월 25-26일. 충남대학교. p6.
- 황학빈 · 이태원. 2008. EPMA와 LA-ICPMS를 이용한 뱀장어 이석의 미량원소 분석 및 결과 비교. 2008년 한국어류학회 춘계 학술발표대회 논문 요약집. 2008년 4월 25-26일. 충남대학교. p33
- 이태원 · 황학빈 · 황선완 · 황선도 · 문형태. 2008. 천제연하구 소상어류의 종조성 변화. 2008년 한국어류학회 춘계 학술발표대회 논문 요약집. 2008년 4월 25-26일. 충남대학교. p40.
- 최일수, 황선도 · 이태원. 2008. GAM (Generalized Additive Model)을 이용한 금강 뱀장어 소상 요인 분석. 2008년 한국어류학회 춘계 학술발표대회 논문 요약집. 2008년 4월 25-26일. 충남대학교. p43.
- Sun-Do Hwang , Tae Won Lee, Il-Su Choi. 2007. Environmental factors affecting the daily catch levels of eel, *Anguilla japonica*, larvae in the Geum-river estuary, Korea. 2007년 한국어류학회 추계 학술발표대회 논문 요약집. 2007년 11월 9일. 전남대학교. p3
- 황선도 · 이태원 · 김진환 · 황학빈 · 황선재 · 문대연. 2007. 실뱀장어용 생태 어도 설계를 위한 소상행동 연구 소개. 2008년 한국어류학회 춘계 학술발표대회 논문 요약집. 2008년 4월 25-26일. 충남대학교. p6.
- 황학빈 · 이태원. 2007. 알콜, 포르말린 고정 후 시간에 따른 은어(*Plecoglossus altivelis altivelis*)의 진장변화. 2007년 한국어류학회 추계 학술발표대회 논문 요약집. 2007년 11월 9일. 전남대학교. p66.
- 황학빈, 이태원, 황선완, 황선도. 2007. 중성 염료 표지 방류 방법을 이용한 실뱀장어 자원량 추정. 한국수산학회 자원분과 학술 발표회 논문 요약집. 2007년 8월 24일. 경주 교육문화회관. p21.

○ 박사 학위 논문

황학빈 2010. 금강과 만경강 하구에서 채집된 뱀장어 *Anguilla japonica*의 성비, 연령, 성장
과 서식처 유형. 충남대학교 대학원 박사 학위논문, 95pp.

○ 홍보 실적

- 2007. 2.14. 20:00-21:00 KBS1
환경 스페셜. '물고기 사람에게 길을 묻다'. 자문 촬영
- 2008.8.4. MBC
환경 documentary '장어와 인간' 자문 촬영
- 2008.8.4. 11:00-11:50 FSTV
'민물 장어의 꿈' 자문 촬영
- KBS 네트워크특선 '장어 변신을 꿈꾸다'
 - 2008년 6월 12일 07:30 광주 KBSTV
 - 2008년 7월 9일 00:30-0120 KBS1 TV '장어 변신을 꿈꾸다'

제 6 장 참고문헌

- 강언중, 김응오, 양현, 이흥헌, 최성국, 2007. 낙동강 하구둑을 이용한 어류의 이동. 2007년 한국어류학회 추계학술발표대회 논문 요약집, pp. 63.
- 김성원, 임상구, 손상규, 이진환, 2008. 시판 뱀장어용 부상사료 및 반죽사료에 대한 치어기 뱀장어(*Anguilla japonica*)의 성장 및 사육수질 비교. 한국수산해양교육연구, 20(1): 90-94.
- 김을배. 1974. 제주도산 실뱀장어의 소상 동태에 관하 연구: 특히 환경요인과의 관계를 중심으로. 한국육수학회지, 7: 1-22.
- 김인배, 김용억, 조재윤, 1977. 뱀장어 양식에 관한 연구, 한국수산학회지, 10(2): 115-124.
- 김인배, 조재윤, 1974. 뱀장어의 초기사육에 관한 연구. 한국수산학회지, 7(4): 179-186.
- 문형태. 2002. 실뱀장어 이석의 미세구조와 어획 자료를 이용한 뱀장어 *Anguilla japonica*의 초기 생활사. 충남대학교 대학원 박사학위논문, 111 pp.
- 배준영, 한경민, 이준호, 김상은, 이정열, 배승철, 2008. 사료내 맥반석과 BAISM 복합첨가가 치어기 뱀장어 *Anguilla japonica*의 성장과 내병성에 미치는 영향. 한국양식학회지, 21(1) : 26-33
- 양홍준 · 김구환 · 금지돈. 2001. 낙동강하구의 어류상과 댐의 어도에서 어류의 이동. 한국육수학회지, 34: 251-258.
- 이태원, 2003. 실뱀장어 자원 예측을 위한 뱀장어 초기 생활사와 소상 생태 연구. 수산특정연구과제최종보고서(과제번호: 20000137), 85 pp.
- 장준호, 양현, 황중서, 2009. 금강 하구둑 어도를 이용한 어류의 이동 특성. 한국수산과학총연합회 공동학술대회 발표요지집, pp. 195.
- 전승관 · 주광현 · 주태근. 1971. 뱀장어 양식시험. 국립수산진흥원 사업보고(담수양식) 제8호, 국립수산진흥원, 부산, pp. 7-36.
- 황중서, 2000. 농업기반시설의 어도설치 현황과 개선 방안. 한국수자원학회지, 33: 41-52.
- 황중서, 2003. 댐의 어도 설치 현황과 개선방안. 한국환경생태학회 2003년도 추계학술논문발표회 논문집, pp. 73-104.
- Aida, K., K. Tsukamoto and K. Yamauchi, 2003. Eel Biology. Springer-Verlag, Tokyo, 497 pp.
- Aoyama, J. and M.J. Miller, 2003. The Silver Eel. In: Eel Biology, edited by Aida, K., K. Tsukamoto and K. Yamauchi, Springer-Verlag, Tokyo, pp. 107-117.
- Arai, T., A. Kotake, M. Ohji, M.J. Miller, K. Tsukamoto and N. Miyazaki, 2003. Occurrence of sea eels of *Anguilla japonica* along the Sanriku Coast of Japan.

- Ichthy. Res., 50: 78-81.
- Arai, T., A. Kotake, P.M. Lokman, M.J. Miller and K. Tsukamoto, 2004. Evidence of different habitat use by New Zealand freshwater eels *Anguilla australis* and *A. dieffenbachii*, as revealed by otolith microchemistry. Mar. Ecol. Prog. Ser., 266: 213-225.
- Bagenal, T.B. and F.W. Tesch, 1978. Age and growth. In: Methods for assessment of fish production in fresh waters, edited by Bagenal, T. B., Blackwell, Oxford, pp. 101-136.
- Bellini, A., 1970. Experiences sur l'élevage de l'anguille en stabulation a Comacchio. Bulletin de la Societe Centrale d' Aquiculture et de Peche, III-x: 1-40.
- Bertin, L., 1951. Les Anguilles. Payot, Paris, 191 pp.
- Bonhommeau, S., E. Chassot, B. Planque, E. Rivot, A.H. Knap and O. Le Pape, 2008. Impact of climate on eel populations of the Northern Hemisphere. Mar. Ecol. Prog. Ser., 373: 71-80.
- Briand, C., D. Fatin, G. Fontenelle and E. Feunteun. 2005. Effect of re-opening of a migratory pathway for eel (*Anguilla Anguilla*, L.) at a watershed scale. Bull. Fr. Peche Piscic., 378-379: 67-86.
- Campana, S.E. and J.D. Neilson, 1985. Microstructure of fish otoliths. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 42: 1014-1032.
- Campana, S.E., 1999. Chemistry and composition of fish otoliths: pathways, mechanisms and applications. Mar. Ecol. Prog. Ser., 188: 263-297.
- Chang, C.W., Y. Iizuka and W.N. Tzeng, 2004. Migratory environmental history of the grey mullet *Mugil cephalus* as revealed by otolith Sr:Ca ratios. Mar. Ecol. Prog. Ser., 269: 277-288.
- Cheng, P.W. and W.N. Tzeng, 1996. Timing of metamorphosis and estuarine arrival across the dispersal range of the Japanese eel *Anguilla japonica*. Mar. Ecol. Prog. Ser., 131: 87-96.
- Cheng, P.W. and W.N. Tzeng. 1996. Timing of metamorphosis and estuarine arrival across the dispersal range of the Japanese eel *Anguilla japonica*. Mar. Ecol. Prog. Ser., 131: 87-96.
- Chow, S., H. Kurogi, N. Mochioka, S. Kaji, M. Okazaki and K. Tsukamoto. 2009. Discovery of mature freshwater eels in the open ocean. Fish. Sci., 75: 257-259
- Daverat, F., K.E. Limburg, I. Thibault, J.-C. Shiao, J.J. Dodson, F. Caron, W.-N. Tzeng,

- Y. Iizuka and H. Wickström, 2006. Phenotypic plasticity of habitat use by three temperate eel species, *Anguilla Anguilla*, *A. japonica* and *A. rostrata*. Mar. Ecol. Prog. Ser., 308: 231–241.
- Day, M.K., C.A.S. Hall, W.M. Kemp and A. Yanez–Arancibia, 1989. Estuarine ecology. Wiley–Interscience, New York, pp.
- De Leo, G.A. and M. Gatto, 1996. Trends in vital rates of the European eel: evidence for density dependence? Ecol. Appl., 6: 1281–1294.
- Deelder, C.L., 1970. Synopsis of biological data on the eel *Anguilla Anguilla* (Linnaeus) 1758, Rome, 68 pp.
- Degani, G. and D. Kushnirov, 1992. Effects of 17 β –Estradiol and grouping on sex determination of European eels. Prog. Fish–Cult., 54: 88–91.
- Dekker, W., 2003a. Worldwide decline of eel resources necessitates immediate action–Quebec Declaration of Concern. Fisheries, 28(9): 28–30.
- Dekker, W., 2003b. Did lack of spawners cause the collapse of the European eel, *Anguilla Anguilla*? Fish. Managm. .Ecol., 10(6): 365–376.
- Egusa, S. and H. Hirose, 1973. Further note on sex and growth of European eels in culture ponds. . Bull. Jap. Soc. Sci. Fish., 39(6): 611–616.
- Fontenelle, G., C. Briand and E. Feunteun. 2001. Eel management in France: how are we to face the dilemma of a European wide species?. J. Taiwan Fish. Res., 9: 237–250.
- Guan, R., X. Wang and G. Ke, 1994. Age and growth of eels *Anguilla japonica* in a Chinese river. J. Fish. Biol., 45: 653–660.
- Haedrich, T.C.J. and C.A.S. Hall, 1976. Fishes and estuaries. Oceanus, 19(5): 55–63.
- Han, Y.S. and W.N. Tzeng, 2006. Sex ratio as a means of resource assessment for the Japanese eel *Anguilla japonica*: a case study in the Kaoping River of Taiwan. Zoological Studies, 45: 255–263.
- Han, Y.S. and W.N. Tzeng, 2007. Sex–dependent habitat use by the Japanese eel *Anguilla japonica* in Taiwan. Mar. Ecol. Prog. Ser., 338: 193–198.
- Han, Y.S., I.C. Liao, Y.S. Huang, J.T. He, C.W. Chang and W.N. Tzeng, 2003. Synchronous changes of morphology and gonadal development of silvering Japanese eel *Anguilla japonica*. Aquaculture, 219: 783–796.
- Helfman, G.S., D.E. Facey, L.S.J. Hales and E.L.J. Bozeman, 1987. Reproductive ecology of the American eel. Ameri. Fish. Soc. Sym., 1: 42–56.

- Hirai, N., M. Tagawa, T. Kaneka and M. Tanaka, 1999. Distributional changes in branchial chloride cells during freshwater adaptation in Japanese sea bass *Lateolabrax japonicus*. *Zoological Studies*, 16: 43-49.
- Holmgren, K. and H. Mosegaard, 1996. Implications of individual growth status on the future sex of the European eel. *J. Fish. Biol.*, 49: 910-925.
- Holmgren, K., H. Wickström and P. Clevestam, 1997. Sex-related growth of European eel, *Anguilla Anguilla*, with focus on median silver eel age. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 54: 2775-2781.
- Hwang, S.-D., J.-Y. Kim and T.-W. Lee, 2008. Age, growth, and maturity of chub mackerel off Korea. *North American J. Fish. Management*, 28: 1414-1425.
- Hwang, S.-W., 2006. Occurrence patterns and habitat use of fishes in the Geum River and the Mangyeong River estuaries. Ph. D Thesis, Chungnam National University, Daejeon, 145 pp.
- Jellyman, D.J., 1997. Variability in growth rates of freshwater eels (*Anguilla* spp.) in New Zealand. *Ecological Freshwater Fish*, 6: 108-115.
- Jessop, B.M., J.C. Shiao, Y. Iizuka and W.N. Tzeng, 2002. Migratory behaviour and habitat use by American eels *Anguilla rostrata* as revealed by otolith microchemistry. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 233: 217-229.
- Jessop, B.M., J.C. Shiao, Y. Iizuka and W.N. Tzeng, 2004. Variation in the annual growth, by sex and migration history, of silver American eels *Anguilla rostrata*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 272: 231-244.
- Kagawa et al. 2005. The first success of glass eel production in the world: basic biology on fish reproduction advances new applied technology in aquaculture. *Fish Physiol Biochem* 31:193 - 199
- Kalish, J.M., 1990. Use of otolith microchemistry to distinguish the progeny of sympatric anadromous and non-anadromous salmonids. *Fish. Bull.*, 88: 657-666.
- Kawakami, Y., N. Mochioka, K. Morishita, T. Tajima, H. Nakagawa, H. Toh and A. Nakazono, 1998. Factors influencing otolith strontium/calcium ratios in *Anguilla japonica* elvers. *Environ. Biol. Fish.*, 52: 299-303.
- Kim, D.J., J.Y. Bae and E.O. Kim. 2007. Changes in sex steroid hormones and ovarian development during artificial maturation of female eel, *Anguilla japonica*. *Integrative Bioscience*, 11: 117-124.
- Kim, E.B., 1974. Studies on the upstream status and environmental factors of glass -

- Eel collected in the Cheju Island, Korea. Korean J. Limnol.,7(3): 1-22. (in Korean)
- Kim, W.S., S.J. Yoon., H.T. Moon. and T.W. Lee. 2002. Effects of water temperature changes on the endogenous and exogenous rhythm of oxygen consumption in the glass eels *Anguilla japonica*. Mar. Ecol. Prog. Ser., 243: 209-216.
- Kim, W.S., S.J. Yoon., J.W. Kim., J.A. Lee and T.W. Lee. 2006. Metabolic response under different salinity and temperature conditions for glass eel *Anguilla japonica*, Mar. Biol., 149: 1209-1215.
- Kotake, A., A. Okamura, Y. Yamada, T. Utoh, T. Arai, M.J. Miller, H.P. Oka and K. Tsukamoto, 2005. Seasonal variation in the migratory history of the Japanese eel *Anguilla japonica* in Mikawa Bay, Japan. Mar. Ecol. Prog. Ser., 293: 213-221.
- Kotake, A., T. Arai, T. Ozawa, S. Nojima, M.J. Miller and K. Tsukamoto, 2003. Variation in migratory history of Japanese eels, *Anguilla japonica* collected in coastal waters of the Amakusa Island, Japan, inferred from otolith Sr/Ca ratios. Mar. Biol., 142: 849-854.
- Krueger, W.H. and K. Oliveira, 1999. Evidence for environmental sex determination in the American eel, *Anguilla rostrata*. Environ. Biol. Fish., 55: 381-389.
- Kuhlman, H., 1975. The influence of temperature, food, size, and origin on the sexual differentiation of elvers (*Anguilla Anguilla*). Helgolander Wissenschaftliche Meereuntersuchungen, 27: 139-155.
- Kuhlmann, H., 1975. The influence of temperature, food, size, and origin on the sexual differentiation of elvers (*Anguilla Anguilla*). Helgolander Wissenschaftliche Meereuntersuchungen, 27: 139-155.
- Laidig, T.E., S. Ralston and J. Bence, 1991. Dynamics of growth in the early life history of shortbelly rockfish *Sebastes jordani*. Fish. Bull., 89: 611-621.
- Lee, T.W. and G.C. Kim, 2000. Microstructural growth in otoliths of black rockfish, *Sebastes schlegeli*, from prenatal larval to early juvenile stages. Ichthyological Research, 47(4), 335~341
- Lee, T.W. and J.S. Byun, 1996. Microstructural growth in otoliths of conger eel (*Conger myriaster*) leptocephali during the metamorphic stage. Mar. Biol., 125: 259-268.
- Liew, P.K.L. 1982. Impact of the eel ladder on the upstream migrating eel (*Anguilla rostrata*) population in the St. Lawrence River at Cornwall: 1974-1978. In: Loftus, K.H. (ed.), Proc 1980 N. Am. Eel Conf. Ontario Fish. Tech. Rep. Ser., Vol. 4. Ministry of Natural Resources, Ontario, pp. 17-22.

- Matsui, I., 1952. Studies on the morphology, ecology and pond culture of the Japanese eels (*Anguilla japonica* Temminck & Schlegel). J. Shimonoseki Coll. Fish., 2: 1-245.
- McCleave, J.D. and D.J. Jellyman, 2004. Male dominance in the New Zealand longfin eel population of a New Zealand River: Probable causes and implications for management. North American J. Fish. Management, 24: 490-505.
- Moriarty, C., 1983. Age determination and growth rate of eels, *Anguilla Anguilla* (L.). J. Fish. Biol., 23: 257-264.
- Nishimura, A. and J. Yamada, 1984. Age and growth of larval and juvenile walleye pollock, *Theragra chalcogramma* (Pallas), as determined by otolith growth increments. J. Exp. Mar. Biol. Ecol., 82: 191-205.
- Okamura, A., Y. Yamada, K. Yokouchi, N. Horie, N. Mikawa, T. Utoh, S. Tanaka and K. Tsukamoto, 2007. A silvering index for the Japanese eel *Anguilla japonica*. Environ. Biol. Fish., 80: 77-89.
- Oliveira, K. and J.D. McCleave, 2002. Sexually different growth histories of the American eel in four rivers in Maine. Trans. Ameri. Fish. Soc., 131: 203-211.
- Oliveira, K., 1994. Age, size, sex, growth, and migrations of yellow and silver phase American eels, University of Rhode Island, Kingston, 126 pp.
- Oliveira, K., 1999. Life history characteristics and strategies of the American eel, *Anguilla rostrata*. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 56: 795-802.
- Oliveira, K., J.D. McCleave and G.S. Wippelhauser, 2001. Regional variation and the effect of lake: river area on sex distribution of American eels. J. Fish. Biol., 58(4): 943-952.
- Otake, T., T. Ishii, M. Nakahara and R. Nakamura, 1994. Drastic changes in otolith strontium/calcium ratios in leptocephali and glass eels of Japanese eel *Anguilla japonica*. Mar. Ecol. Prog. Ser., 112: 189-193.
- Panfili, J., M.C. Ximénès and A. Crivelli, 1994. Sources of variation in growth of the European eel (*Anguilla Anguilla*) estimated from otoliths. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 51: 506-515.
- Parson, J., K.U. Vickers and Y. Warden, 1977. Relationship between elver recruitment and changes in the sex ratio of silver eels *Anguilla Anguilla* L. migrating from Lough Neagh, Northern Ireland. J. Fish. Biol., 10: 211-219.
- Poole, W.R. and J.D. Reynolds, 1996. Growth rate and age at migration of *Anguilla*

- Anguilla*. J. Fish. Biol., 48: 633-642.
- Potter, I.C., P.N. Claridge and R.M. Warwick, 1986. Consistency of seasonal changes in an estuarine fish assemblage. Mar. Ecol. Prog. Ser., 32: 217-228.
- Radtke, R.L., D.W. Townsend, S.D. Folsom and M.A. Morison, 1990. Strontium:Calcium ratios in larval herring otoliths as indicators of environmental histories. Environ. Biol. Fish., 27: 51-61.
- Roncarati, A., P. Melotti, O. Mordenti and L. Gennari, 1997. Influence of stocking density of European eel (*Anguilla Anguilla*, L.) elvers on sex differentiation and zootechnical performances. J. Appl. Ichthyol., 13: 131-136.
- SAS. 1989. SAS/STAT User's Guide. Ver. 6. Cary. NC, SAS Institute Inc.
- Schirripa, M.J., 2002. An evaluation of back-calculation methodology using simulated otolith data. U.S. National Marine Fisheries Service Fishery Bulletin, 100: 789-799.
- Secor, D.H., 1992. Application of otolith microchemistry analysis to investigate anadromy in Chesapeake Bay striped bass *Morone saxatilis*. Fish. Bull., 90: 798-806.
- Secor, D.H., A. Henderson-Arzapalo and P.M. Piccoli, 1995. Otolith microchemistry chart patterns of migration and habitat utilization in anadromous fishes? J. Exp. Mar. Biol. Ecol., 192: 15-23.
- Shiao, J.C., Y. Iizuka, C.W. Chnag and W.N. Tzeng, 2003. Disparities in habitat use and migratory behavior between tropical eel *Anguilla marmorata* and temperate eel *A. japonica* in four Taiwanese rivers. Mar. Ecol. Prog. Ser., 261: 233-242.
- Sinha, V.R.P. and J.W. Jones, 1975. The European Freshwater Eel. Liverpool Univ. Press, Liverpool, 146 pp.
- Svedäng, H., H. Wickström, M. Reizenstein, K. Holmgren and P. Florenius, 1998. Accuracy and precision in eel age estimation, using otoliths of known and unknown age. J. Fish. Biol., 53: 456-464.
- Tabeta, O., 1996. Early Life History and Prospects of Seed Production of the Japanese eel *Anguilla japonica*. 恒星社厚生閣, Tokyo, 130 pp.
- Tanaka H, H. Kagawa and H. Ohta. 2001. Production of leptocephali of Japanese eel, *Anguilla japonica* in captivity. Aquaculture, 201: 51-60.
- Tanaka, H. 1999. Early life history of artificial hatching eel. In: Symposium on 'The present state of fishery management and conservation strategies for a population of the Japanese eel, *Anguilla japonica*.' Ocean Res. Inst., Univ. of Tokyo. Sept, 1999.

- Tanaka, H. 2001. Larval rearing and development. pp. 89-91. In: K. Aida *et al.*, (ed.), Proceedings of the International Symposium on advances in Eel Biology. Univ. of Tokyo. Sept. 28-30.
- Tesch, F.-W. 2003. The Eel (3rd edition). Blackwell Science, Iowa. 408 pp.
- Townsend, D.W., R.L. Radtke, S. Corwin and A.L. David, 1992. Strontium:Calcium ratios in juvenile Atlantic herring *Clupea harengus* L. otoliths as function of water temperature. J. Exp. Mar. Biol. Ecol., 160: 131-140.
- Tsukamoto, K. and T. Arai, 2001. Facultative catadromy of the eel *Anguilla japonica* between freshwater and seawater habitats. Mar. Ecol. Prog. Ser., 220: 265-276.
- Tsukamoto, K., 1990. Recruitment mechanism of the eel, *Anguilla japonica*, to the Japanese coast. J. Fish. Biol, 36: 659-671.
- Tsukamoto, K., 2006. Spawning of eels near a seamount. Nature, 439: 929.
- Tsukamoto, K., I. Nakai and F.W. Tesch, 1998. Do all freshwater eels migrate? Nature, 396: 635-636.
- Tsukamoto, K., T. Otake, N. Mochioka, T.-W. Lee, H. Fricke, T. Inagaki, J. Aoyama, S. Ishikawa, S. Kimura, M.J. Miller, H. Hasumoto, M. Oya and Y. Suzuki, 2003. Seamounts, new moon and eel spawning: The search for the spawning site of the Japanese eel. Environ. Biol. Fish., 66: 221-229.
- Tzeng, W.N., 1985. Immigration timing and activity rhythms of the eel, *Anguilla japonica*, elvers in the estuary of northern Taiwan, with emphasis on environmental influence. Bull. Jap. Soc. Sci. Oceanogr., 47-48: 11-27.
- Tzeng, W.N., 1996. Effects of salinity and ontogenetic movements on strontium:calcium ratios in the otoliths of the Japanese eel, *Anguilla japonica* Temmink and Schlegel. J. Exp. Mar. Biol. Ecol., 199: 111-122.
- Tzeng, W.N., 2003. Life history patterns of Japanese eel *Anguilla japonica* in Mikawa Bay, Japan. In: Biology, management, and protection of atadromous eels, edited by Douglas, A. D., American Fisheries Society, Symposium 33, Bethesda, Maryland, pp. 285-293.
- Tzeng, W.N., C.H. Wang, H. Wickstrom and M. Reizenstein, 2000b. Occurrence of the semi-catadromous European eel *Anguilla Anguilla* in the Baltic Sea. Mar. Biol., 137: 93-98.
- Tzeng, W.N., H.R. Lin, C.H. Wang and S.N. Xu, 2000a. Differences in size and growth rates of male and female migrating Japanese eels in Pearl River, China. J. Fish.

- Biol., 57: 1245–1253.
- Tzeng, W.N., J.C. Shiao and Y. Iizuka, 2002. Use of otolith Sr:Ca ratios to study the riverine migratory behaviors of Japanese eel *Anguilla japonica*. Mar. Ecol. Prog. Ser., 245: 213–221.
- Tzeng, W.N., P.W. Cheng and F.Y. Lin, 1995. Relative abundance, sex ratio and population structure of the Japanese eel *Anguilla japonica* in the Tahshui River system in northern Taiwan. J. Fish. Biol., 46: 183–201.
- Tzeng, W.N., Y. Iizuka, J.C. Shiao, Y. Yamada and H.P. Oka, 2003. Identification and growth rates comparison of divergent migratory contingents of Japanese eel (*Anguilla japonica*). Aquaculture, 216: 77–86.
- Usui, A., 1974. Eel Culture. Fishing News Ltd., London, 186 pp.
- Vladykov, V.D., 1966. Remarks on the American eel (*Anguilla rostrata* Le Sueur): size of elvers entering streams; the relative abundance of adult males and females; and present economic importance of eels in North American. Verhandlungen der Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie, 16: 1007–1017.
- Vøllestad, L.A., 1992. Geographic variation in age and length at metamorphosis of maturing European eel: environmental effects and phenotypic plasticity. Journal of Animal Ecology, 61: 41–48.
- Vøllestad, L.A., R. Lecomte-Finiger and B. Steinmetz, 1988. Age determination of *Anguilla Anguilla* (L.) and related species. EIFAC Occas. Pap., 21: 1–28.
- Von Bertalanffy, L., 1938. A quantitative theory of organic growth. Hum. Biol., 10: 181–243.
- Walsh, C.T., B.C. Pease and D.J. Booth, 2004. Variation in the sex ratio, size and age of longfinned eels within and among coastal catchments of south-eastern Australia. J. Fish. Biol., 64: 1297–1312.
- Walsh, C.T., B.C. Pease, S.D. Hoyle and D.J. Booth, 2006. Variability in growth of longfinned eels among coastal catchments of south eastern Australia, pp. 1693–1706.
- Watanabe, S., J. Aoyama and K. Tsukamoto. 2004. Reexamination of Ege's (1939) use of taxonomic characters of the genus *Anguilla*. Bull. Mar. Sci., 74: 337–351.
- Watanabe, S., J. Aoyama and K. Tsukamoto. 2009. A new species of freshwater eel *Anguilla luzonensis* (Teleostei: Anguillidae) from Luzon Island of the Philippines.

Fish. Sci., 75(2): 387-392.

Yamamoto, K. and K. Yamauchi. 1974. Sexual maturation of Japanese eel and production of eel larvae in the aquarium. *Nature*, 251: 220-222.

Yamauchi, K., M. Nakamura, H. Takahashi and K. Takano. 1976. Cultivation of larvae of Japanese eel. *Nature*, 263: 412.

주 의

1. 이 보고서는 농림수산식품부에서 시행한 해양수산연구개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 농림수산식품부에서 시행한 해양수산연구개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.