

실뱀장어 자원 예측을 위한
뱀장어의 초기생활사와 소상 생태 연구

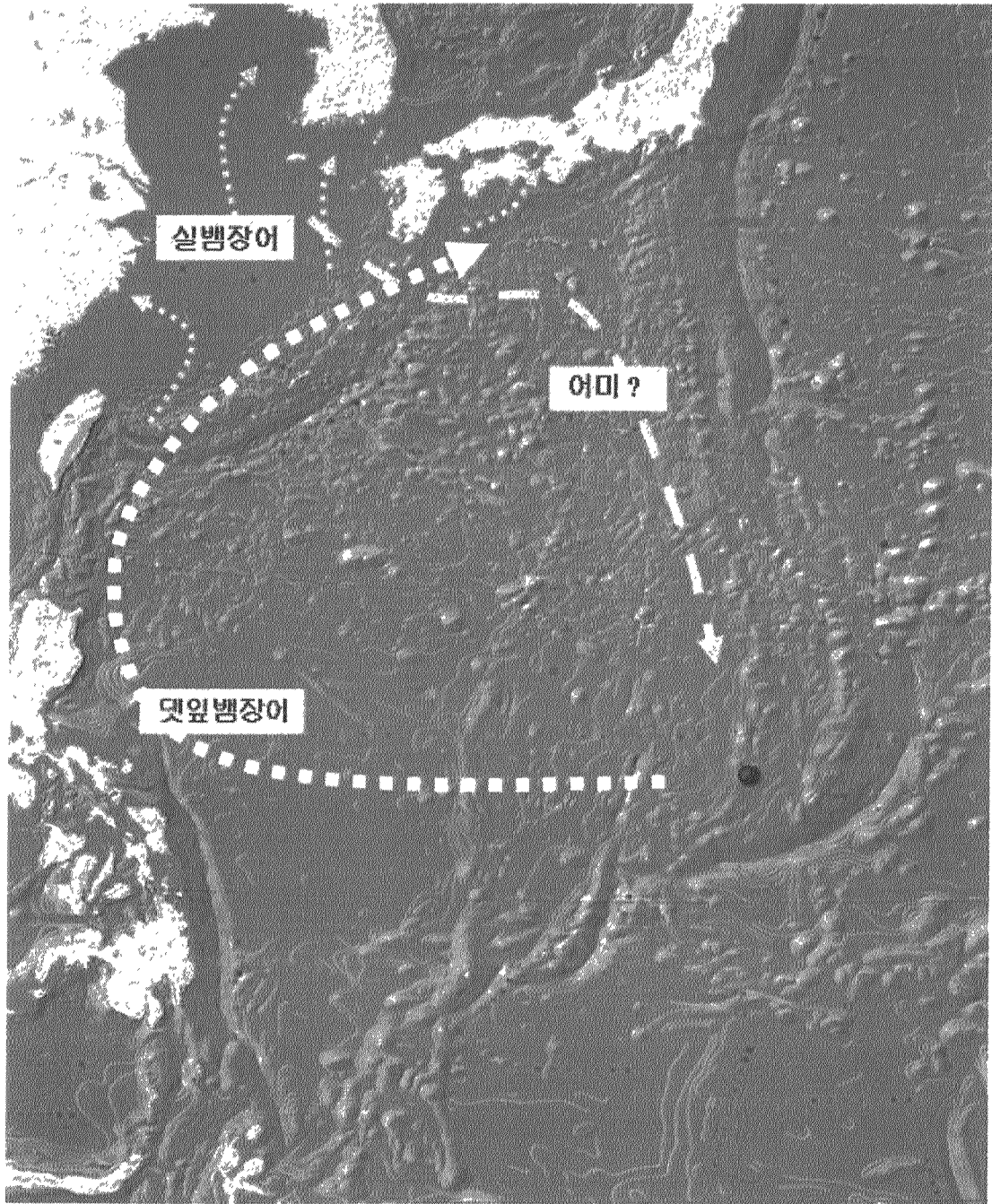
A study of the early life history and migration of
glass eels in order to predict stock size

2003. 12

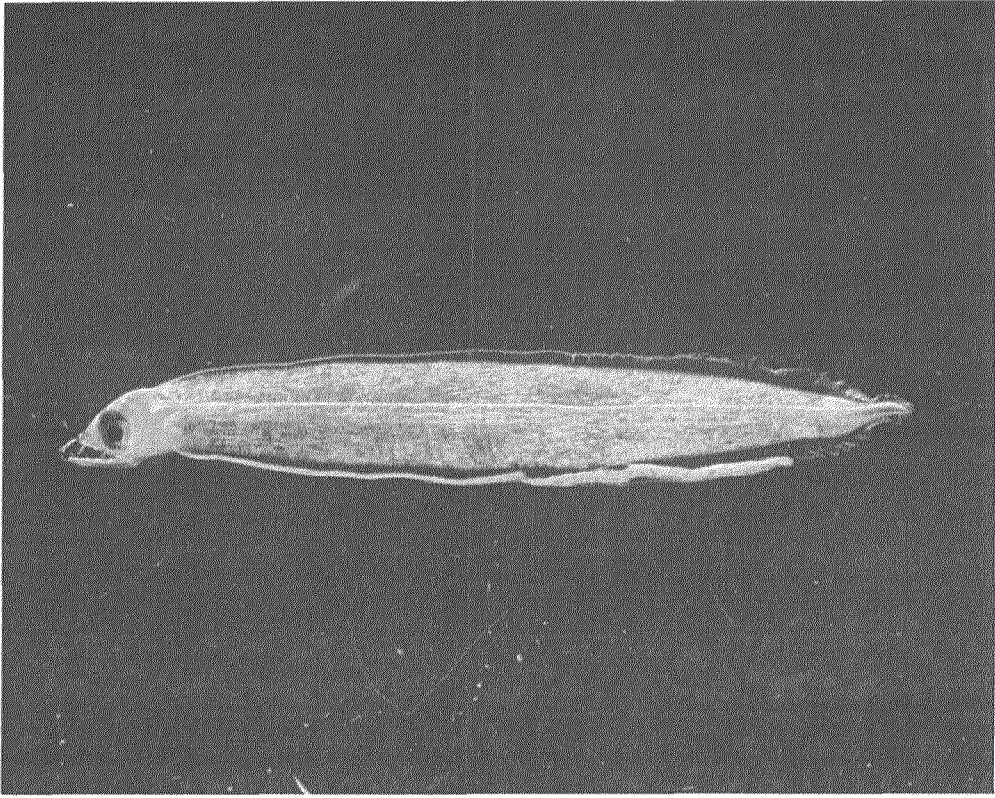
주관연구기관: 충 남 대 학 교

협동연구기관: 서해수산연구소

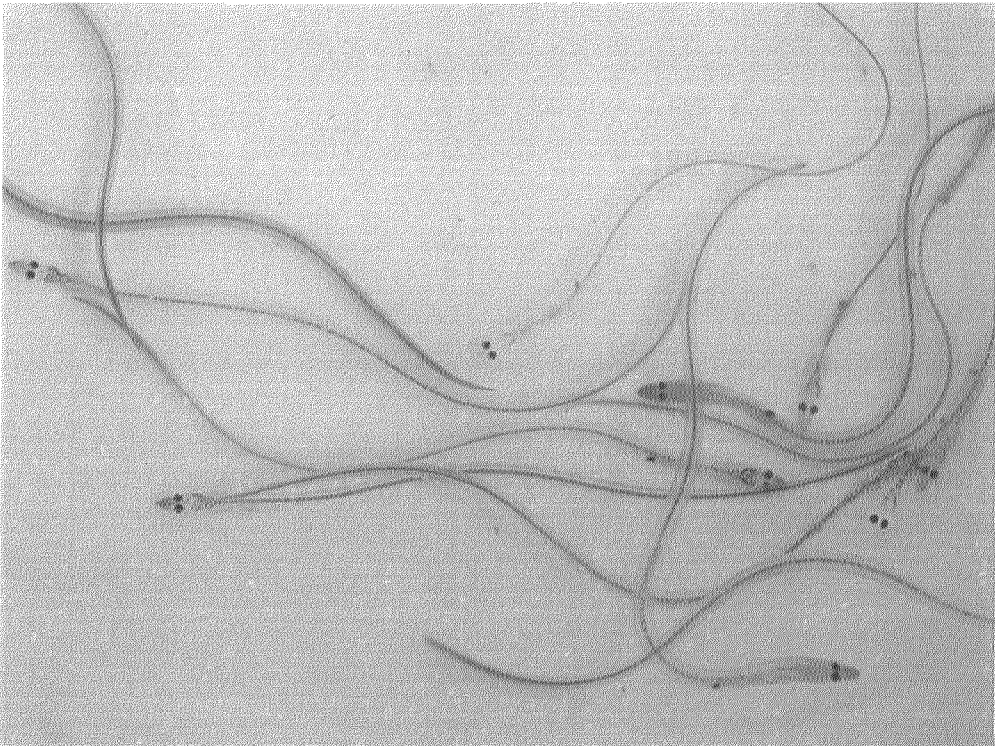
해 양 수 산 부



뱀장어의 회유로



뱃잎뱀장어



염색 표지된 실뱀장어

제 출 문

해양수산부 장관 귀하

본 보고서를 “실뱀장어 자원 예측을 위한 뱀장어의 초기생활사와 소상 생태 연구”에 관한 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2003 년 12 월 일

주관 연구기관 : 충남대학교

총괄연구책임자 : 이 태 원

협동 연구기관 : 서해수산연구소

협동연구책임자 : 조 영 조

참여 연구원

역할	성명	소속	직위	비고
총괄 책임자	이태원	충남대학교 해양학과	교수	
협동과제 책임자	양원석	서해수산연구소 군산분소	분소장	1,2차년도
“	조영조	“	“	3차년도
연구원	문형태	충남대학교 해양학과	박사	1,2차년도
“	김광천	“	석사	“
“	황선완	“	박사과정	3차년도
“	황학빈	“	“	“
“	윤성진	“	“	
연구 조원	노형수	“	석사과정	
“	오지나	“	“	3차년도
연구원	황선도	서해수산연구소 군산분소	연구사	
“	최옥인	“	“	
“	임동현	“	“	
“	윤원득	“	“	
“	김치홍	“	“	
연구조원	김소희	“	연구조원	1,2차년도
“	윤기중	“	“	3차년도
자문위원	김완수	한국해양연구원	책임연구원	
“	임현만	충남대학교	교수	
“	K. Tsukamoto	동경대학교	교수	일본
“	M. Miller	동경대 해양연구소	직원연구원	일본
“	T. Stewart	Ontario 수산연구소	연구원	캐나다

요 약 문

I. 제 목

실뱀장어 자원 예측을 위한 뱀장어의 초기생활사와 소상 생태 연구

II. 연구개발의 목적 및 중요성

뱀장어는 국내 주 양식어종 중의 하나이지만 아직 종묘 대량 생산 기법이 정립되지 않아 하구로 소상하는 실뱀장어를 잡아 양식한다. 근래에 국내 실뱀장어 소상량이 감소하며, 실뱀장어 자원 관리가 필요하게 되었다. 그러나, 국내에서는 아직 실뱀장어 소상 생태가 구체적으로 알려져 있지 않아 본 연구에서는 뱀장어의 초기 생활사와 실뱀장어 소상 생태를 연구하고 실뱀장어 자원 예측 및 관리 방향을 제시하였다.

III. 연구개발 내용 및 범위

- 초기 생활사 추정: 산란장 주변에서 채집된 뱀뱀장어와 하구에서 채집된 실뱀장어 체장 및 이석의 미세구조를 분석하여, 산란기, 초기 성장, 변태 기간 및 대륙붕 회유기 생태 추정
- 소상생태: 금강하구에서 소상 기간 동안 일별로 채포량 자료, 해황 및 기상 자료를 분석하여 소상에 미치는 환경요인을 분석하고, 소상에 가장 중요한 요인인 수온 변화에 따른 실뱀장어의 산소소모량 변화를 측정하였으며, 제주도 천제연에서 염색 표지 방류법을 이용하여 자원량을 추정하고 채포량과의 관계를 추정하였다.
- 채포량 증장기 변동과 그 요인: 아시아 3개국의 연도별 실뱀장어 채포량 자료 및 국내 주요 하구 연도별 채포량 증장기 자료를 수집하여 연도별 변동 요인을 분석하고, 초기 생활사, 소상 생태 자료와 종합하여 실뱀장어 자원 예측 방안을 모색하였다.

IV. 연구개발결과

1. 초기 생활사

뱀장어는 북위 17도, 동경 140도 근해 북적도 해류 북단의 염분전선에서 4월에서 7월 사이 그믐 전후 산란하며, 초기 100일 정도까지는 일일 약 0.45 mmTL의 빠른 성장을 보였다. 실뱀장어 이석 미세구조 관찰 결과에 의하면 뱀뱀장어는 북적도해류와 쿠로시오를 따라 회유하여 부화 후 $129 \pm 6.3(\text{mean} \pm \text{SD})$ 일 후 대만-오끼나와 근해에서 실뱀장로 변태를 시작하며 변태기간은 약 45 ± 5.9 일로 추정되었다. 실뱀장어는 제주도에서는 1월에

서 4월 사이, 낙동강에서는 2월에서 5월 사이, 금강에서는 2월 말에서 5월 사이에 채집되었다. 하구에 도달한 실뱀장어는 전장 56.8 ± 2.0 mm로 하구간에 유의한 차이가 없었다.

2. 소상생태

- 금강에서는 2월말 수온이 5°C 정도로 상승하며 실뱀장어가 채집되기 시작하여 수온 8°C 내외의 3월에 최대값을 보였고, 5월초까지 채집되었다. Generalized linear model로 분석한 결과 해에 따라 약간의 차이는 있으나, 실뱀장어 채포량 (inds/net)은 수온에 대해서는 $8-10^{\circ}\text{C}$ 정도에 최대값을 보이는 2차함수로 표시되었으며, 그믐과 보름 조차가 클 때 최대값을 보였다. 또 염분과는 유의한 음의 상관관계를 보였고, 풍속과는 유의한 관계가 없었다.
- 수온은 실뱀장어 소상 및 어획량 변동에 가장 중요한 요인으로, 실험실에서 수온을 올리면서 산소소모량을 측정한 결과, 제주도 실뱀장어의 경우 초기 단계(stage VIA1)의 실뱀장어는 약 13.5°C 까지는 일정한 낮은 값을 보였고 그 이후 약 20°C 까지 증가한 후 감소하였다. 또, 수온을 변화 시키며 산소소모량을 측정한 결과 수온 1°C 변화에도 민감한 반응을 보였다. 이 결과는 대륙붕을 회유하는 동안 먹이를 먹지 못하여 에너지 절약을 위하여 낮은 수온을 따라 이동하며, 수온 변화에 민감함을 설명하여 주었다.
- 제주도 천제연 하구 염색 표지 방류 결과 자원량은 2월에 가장 높았고 2001년 2월 $15,745 \pm 6827$ 마리, 2002년 2월 6857 ± 1271 , 2003년 2월 9013 ± 460 마리로 추정되어 2002년에는 다른 해보다 자원량이 낮았다. 2003년 2월 일일 가입량은 2월에 $R=2.78 \pm 2.48$ 로 높았으며, 3월에는 $R=1.30 \pm 0.47$ 로 낮았다. 실뱀장어의 바다에서 하천으로의 소상률은 밤에 조위가 높아 해수가 하천의 보름 넘치는 4월에는 일일 약 30%가 소상하였으나, 그렇지 않은 3월에는 거의 소상하지 못하였다. 추정된 실뱀장어 자원량은 CPUE (1인당 1일 평균어획량)과 유의한 관계를 보여, 실뱀장어 조업을 하지 않는 해역에서는 평균 CPUE를 추정하면 자원량의 비교 자료로 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 실뱀장어 어획량 증장기 변동

- 아시아 4개국 실뱀장어 총어획량은 지난 20년간 50-150 mt의 범위를 보이며 해에 따른 변화가 심하였다. 일본은 지난 20년간 계속 감소경향을 보였고, 대만은 1990년 중반에 낮은 값을 보였다. 4개국 모두 1996-98년 엘니뇨 때에는 어획량이 낮았다. 국내 실뱀장어 연도별 어획량은 대만이나 일본의 어획량과 유의한 상관관계를 보이지 않았다.
- 국내 주요하구 실뱀장어 수집업자의 각 연도 일별 수집량을 분석한 결과, 제주도에서는 1-2월 연안 수온이 낮은 해에 실뱀장어가 일찍 소상하고 소상기간도 길었으나, 수온이

상대적으로 높은 해에는 늦게 소상하기 시작하고 소상 기간도 짧았다. 이와 같은 경향은 영광 및 금강하구에서도 비슷하였으며, 엘리뇨 해인 1998년에는 모든 하구에서 어획량이 낮았다. 제주, 영광 및 금강하구 연도별 어획량은 서로 유의한 상관관계를 보여 제주 하구 자료로부터 국내 전체 어획량을 경향을 파악할 수 있을 것으로 추정된다.

V. 연구개발결과의 활용계획

- 실뱀장어 소상량은 엘리뇨가 심한 해에 낮을 것으로 예측되며, 각 하구의 소상량이 서로 유의한 상관 관계를 나타내어 소상 초기 제주도에서 상대 자원량을 추정하고 제주 연안 수온 자료와 종합하면, 국내 전체 어획량의 상대값을 예측할 수 있을 것으로 추정된다.
- 본 연구에서 밝혀진 실뱀장어 소상 생태는 국내 실뱀장어 자원 관리 방안에 이용될 수 있고, 또, 전세계적으로 문제가 되고 있는 뱀장어 자원 감소에 대한 뱀장어 자원 회복 및 관리 대책 수립에 이용될 수 있다.

SUMMARY

I. Title

A study of the early life history and migration of glass eels in order to predict stock size

II. Objects of the study

The eel, *Anguilla japonica*, has been one of the important fishery resources in East Asian countries. The eels have been cultured by growing the glass eels collected in the estuaries because the glass eels have not yet been produced in the laboratory. Since the glass eel catch has not fully supported the demand for aquaculture, the data on their ecology is needed to assess and manage the eel stock. Little is known, however, about the ecology of the glass eels in the Korean waters. In this study, we determined some aspects of the early growth history of eels and ecology of the glass eels, and proposed the future management of glass eel resources.

III. Subjects and methods

Some aspects of the early growth history of eels were determined by analysis of length composition and otolith microstructure of leptocephali collected around the spawning grounds and glass eels samples collected in the Korean estuaries.

The factors affecting the upstream migration of glass eels were determined by analysis of daily catch data relating to the water quality and atmospheric data in the Geum River estuary. Monthly glass eel abundances were estimated by the mark-recapture method and the correlation between abundance and the catch rate was estimated in the Jeju estuary. The effect of temperature on oxygen consumption rate of glass eels was measured in the laboratory.

The annual variation of glass eel catch was analyzed using the annual catch data from the three Asian countries and from the Korean estuaries, and one possible method to predict the relative annual catch of glass eels was proposed by combination of the results obtained in the study on the early growth history and the upstream migration

III. Results

A. japonica is known to spawn in the salinity front formed at the northern margin of North Equatorial Current (NEC). Examination of otolith microstructure of leptocephali revealed that the eels spawn during the new moons of between April and July and the leptocephali grow at the rate of 0.45 mm TL/d. The number of daily growth increments in glass eel otoliths indicated that the leptocephali began to be metamorphosed into glass eels at the mean age of 129 ± 6.3 d (mean \pm SD), and mean duration of metamorphosis was 45 ± 5.9 d. The glass eels are found principally occurred

from January to April in the Jeju estuaries, from February to May in the Nakdong River estuary, and from late February to May in the Geum River estuary. The mean total lengths and the number of growth increments in otoliths did not show significant differences between glass eels collected in the different Korean estuaries

Daily glass eel catch data in the Geum River estuary by the fishermen during the upstream seasons from 2001 to 2003 were collected and analyzed these catch data relating to the water quality and climatic factors using the generalized linear model. The mean daily glass eel catch per net can be expressed by the quadratic equation versus water temperature showing maximum at the temperature of 8–10°C. The catch showed peaks during the spring tides at the new and full moons. The catch was negatively related to the salinity and did not show the relationship to the wind velocity.

The stock size of glass eels in the Cheonjeyen estuary was estimated by the marking experiment with vital dyes. The stock sizes in February were estimated to be 15,745±6827 individuals in 2001, 6857±1271 individuals in 2002 and 9013±460 individuals in 2003. The migrating rate from the sea to the estuary was high ($R=2.78\pm 2.48$) in March 2003, and became low ($R=1.30\pm 0.47$) in April 2003. The upstream migrating rate from the estuary to the freshwater was nearly null in March 2003 and ca. 30% in April. The upstream migrating rate was related to the over flow of the sea water into the freshwater reservoir through the channel during the high tide at night. The estimated stock size was significantly related to the catch per person per night.

The water temperature was the most important factor on the upstream migration of glass eels and their catch variations. The effect of thermal effect on the oxygen consumption rate (OCR) of glass eels was determined using the automatic-intermittent flow respirometer. The OCR of glass eels in the early pigment developmental stage (stage VIA1) maintained low value by 13.5°C. Thereafter the OCR increased gradually till ca. 20 °C, and then decreased. The glass eels were sensitive to the temperature variation of even 1°C differences. These results indicated that the glass eels are sensitive to the narrow temperature variation, and suggested that the glass eels may migrate in cold water during their migration over continental shelf to save energy when they do not feed.

The annual catch of glass eel in the East Asian countries varied greatly from 50 to 150 mt. The Japanese catch decreased gradually during the last 20 years, and the Taiwanese catch was low in the mid 1990s. The catch during El Nino years in 1997–98 was low in all the four countries. Korean catch did not showed a significant correlation to Japanese or Taiwanese catches.

We analyzed the daily trade data of glass eels in the Korean estuaries recorded by the small traders. The glass eels in the Jeju estuaries began to be caught earlier and the catch duration was longer during the years when the coastal water temperature

was lower than during the years of higher temperature. This annual trend was similar in the Yeonkwang and Keum River estuaries. The annual catch in the Jeju, Yeonkwang and Keum River estuaries showed a significant correlations between them, suggesting that the annual total catch in Korea could be estimated from an estuary catch.

IV. Future application of the results obtained.

The glass eel catch would be expected to be low during the El Nino years. Since the annual catches in the Korean estuaries were highly correlated each other, the relative annual total catch in Korea could be predicted from the abundance data in Jeju estuary and the coastal water temperature off Jeju Island.

The results obtained in this study can be used for the assessment and management of eel resources which has been known to markedly decrease throughout the world.

CONTENTS

Chapter 1. Introduction	12
Chapter 2. Early growth history of eels	17
1. Spawning time and body growth rate determined from length composition and otolith microstructure of leptocephali collected from the spawning ground	17
2. Early growth history determined from length composition and otolith microstructure of glass eels collected from the Korean estuaries	25
Chapter 3. Ecology of glass eels during their upstream migration	41
1. Ecology of glass eels during their upstream migration in the Geum River estuary	41
2. Temperature effect on the endogenous rhythms in glass eels	46
3. Estimation of stock size by mark-recapture method in the Cheonjeyeon estuary of Jeju Island	51
Chapter 4. Variation in glass eel catch	55
1. Annual variation of glass eel catch in the four East Asian countries	55
2. Short- and long-term variations of glass eel catch in the Korean estuaries	57
3. Method to predict the annual catch	62
Chapter 5. Achievement of the initial goals and contribution to the related fields	64
Chapter 6. Application of the results obtained to the future studies	65
Chapter 7. Information obtained from abroad during the study	70
Reference	80

목 차

제 1 장 연구개발의 필요성	12
1. 뱀장어 시장 규모	12
2. 실뱀장어 어획량 변동과 문제점	12
3. 뱀장어 자원 관리의 방향	14
4. 국내의 전망과 연구 목적	16
제 2 장 뱀장어의 초기 생활사	17
제 1 절 산란장 주변해역에서 채집된 뱀장어의 체장 분포와 이석의 미세구조를 이용한 산란일과 체장 성장	17
1. 서 론	17
2. 재료 및 방법	19
3. 결과	20
가. 체장 조성	20
나. 산란기	20
다. 체장과 이석의 성장	22
라. 뱀장어 체장과 일륜수로부터 추정된 산란기	23
제 2 절 한반도 하구에서 채집된 실뱀장어의 체장 분포와 이석 미세구조를 이용한 초기생활사	25
1. 서 론	25
2. 재료 및 방법	25
3. 결과	26
가. 전장 분포	26
나. 색소 발달 단계 분포	29
다. 이석의 미세구조	31
4. 토의	33
가. 실뱀장어 전장 및 색소발달단계의 지리적 분포	33
나. 산란기 추정의 문제점	34
다. 변태 때의 전장추정	36
라. 초기생활사 해석(변태~실뱀장어기 회유 및 성장)	38
제 3 장 실뱀장어의 소상 생태	41
제 1 절 금강 하구 실뱀장어 소상생태	41
1. 서 론	41
2. 재료 및 방법	41

3. 결과 및 토의	43
가. 실뱀장어 어획량 변동과 소상 환경	43
나. 소상 요인	43
제 2 절 수온 변동에 따른 실뱀장어의 생리적 반응	46
1. 서 론	46
2. 재료 및 방법	46
3. 결 과	47
4. 결 론	49
제 3 절 염색 표지 방류 방법을 이용한 제주 천제연 하구 실뱀장어 자원량 추정	51
1. 서 론	51
2. 재료 및 방법	51
3. 결과 및 토의	52
제 4 장 실뱀장어 어획량 변동	55
제 1 절 아시아 4개국 실뱀장어 어획량 변화	55
제 2 절 국내 하구 실뱀장어 채포량 증장기 변동	57
1. 자료수집	57
2. 실뱀장어 채포량의 단기 및 연변동	58
제 3 절 실뱀장어 자원량 예측 방안	62
1. 남방진동지수(SOI)와 실뱀장어 어획량과의 관계	62
2. 대륙붕 수온과 실뱀장어 소상량과의 관계	63
3. 각 하구역 실뱀장어 소상량의 상관관계	63
4. 실뱀장어 자원 예측 방안	63
제 5 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	64
제 6 장 연구개발결과의 활용계획	65
1. 활용전망	65
2. 연구 성과	65
3. 심포지움 주최 및 발표(산학연 관련 전문가 및 어민 대상)	68
제 7 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	70
참고문헌	80

제 1 장 연구개발의 필요성

1. 뱀장어 시장 규모

2001년 국내에서는 연간 약 1만 톤 정도의 뱀장어가 생산되며, 그 대부분이 양식에서 생산된다. 동아시아 4개국의 뱀장어 생산량은 21.2만 톤이며, 중국이 13.6만 톤, 일본이 2.4만 톤, 대만이 3.2만 톤을 생산한다(그림 1). 소비량은 우리나라가 약 1.5만여 톤이며, 약 5,000 톤 정도를 중국으로부터 수입한다. 일본은 동아시아의 생산량 중 74%인 15.7만톤을 소비하며, 대부분이 중국에서 수입하고, 일부를 대만에서 수입한다.

뱀장어는 아직 종묘 생산 기법이 완전히 정립되지 않아 강하구에서 소상하는 자연산 실뱀장어를 잡아 양식한다. 뱀장어 1 톤을 양식 생산하기 위해서는 1 kg의 실뱀장어가 필요하기 때문에 국내 뱀장어 양식을 위해서는 약 10톤의 실뱀장어가 필요하다. 동아시아 전체로 212 톤의 실뱀장어 필요하나, 어획되는 실뱀장어는 이에 미치지 못한다. 중국에서는 1990년대부터 부족한 양을 유럽산 실뱀장어를 수입하여 양식하고 있다.

국내 성만(成鰻; 판매 가능하게 자란 뱀장어) kg당 산지 가격은 약 13,000원으로, 생산지 가격 기준으로 약 1,300억 원, 수입량 500억 원과, 실뱀장어의 생산지가격 약 200억 원을 계산하면 국내 뱀장어 시장은 약 2,000억 원에 해당된다. 이렇게 양식 어류 중 수위를 차지하는 어종이고, 근래에 실뱀장어 채포량 감소로 많은 사회 경제적인 문제가 제기되고 있는 어종이지만 이에 대한 기초적인 연구는 미비한 상태이다.

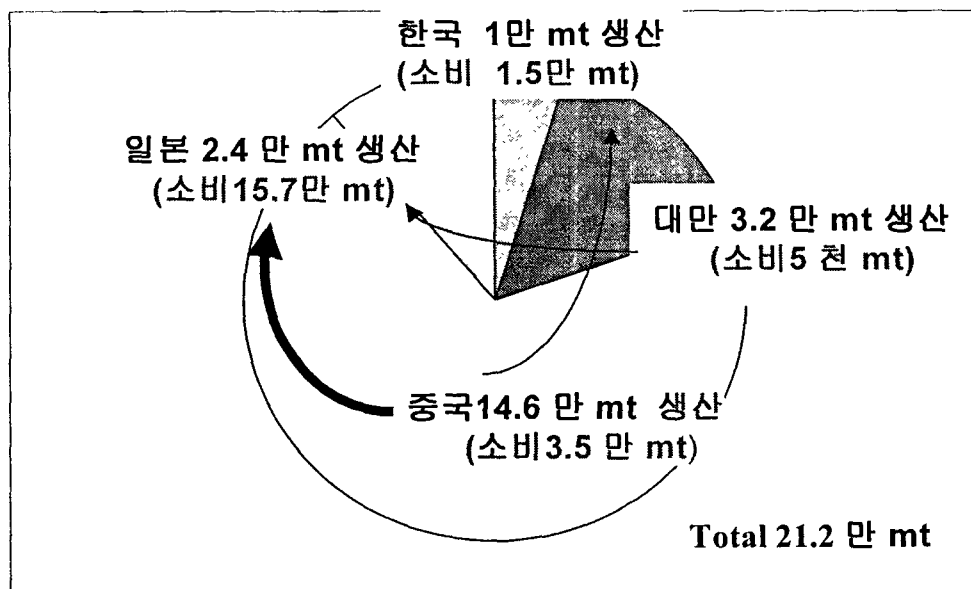


그림 1. 동아시아 4국의 뱀장어 생산량과 소비량 (2001년 기준)

2. 실뱀장어 어획량 변동과 문제점

뱀장어는 아직 종묘 생산 기법이 정립되지 않아 강하구에서 소상하는 자연산 실뱀장어를 잡아 양식한다. 자연산 실뱀장어 채포량은 해에 따라 변화가 심하다(표 1). 1970년대

후반 10톤 이상이 채포되어 일본으로 실뱀장어를 수출한 때도 있었으나, 1990년대에는 5-8톤 정도가 채포되어 국내 양식장에 필요한 수요량에 미치지 못하여 양식에 어려움이 있다.

이러한 실뱀장어 공급 부족으로 kg당 가격은 1980년대 중반 수십만 원이었으나, 1990년대 초 100만 원이 넘었고 1990년대 중반 500만 원 이상으로 상승하였으며, 1998년에는 1000만 원 이상이 되어 금값(1200만원/kg)과 비슷하게 되었다. 1998년의 경우, 실뱀장어가 4.8 mt 밖에 어획되지 않아 많은 양식장이 실뱀장어를 입식하지 못하였고, 물량의 부족으로 실뱀장어 채포 말기인 5월에는 1 kg에 1300만 원에도 구하기 어려웠다.

표 1. 연도별 실뱀장어 채포량, 수입량 및 가격

연도	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
채포량(kg)			7141	5135	5940	7090	8000	6000	2500	5600	4800	8500	6200	8000
수입량(kg)			-	80	238	525	998	60	1051	2400	4200	5500	7000	5000
가격(만원/kg)	46	76	138	340	500	600	800	1000	1200	<300	<200	<150	>250	>250

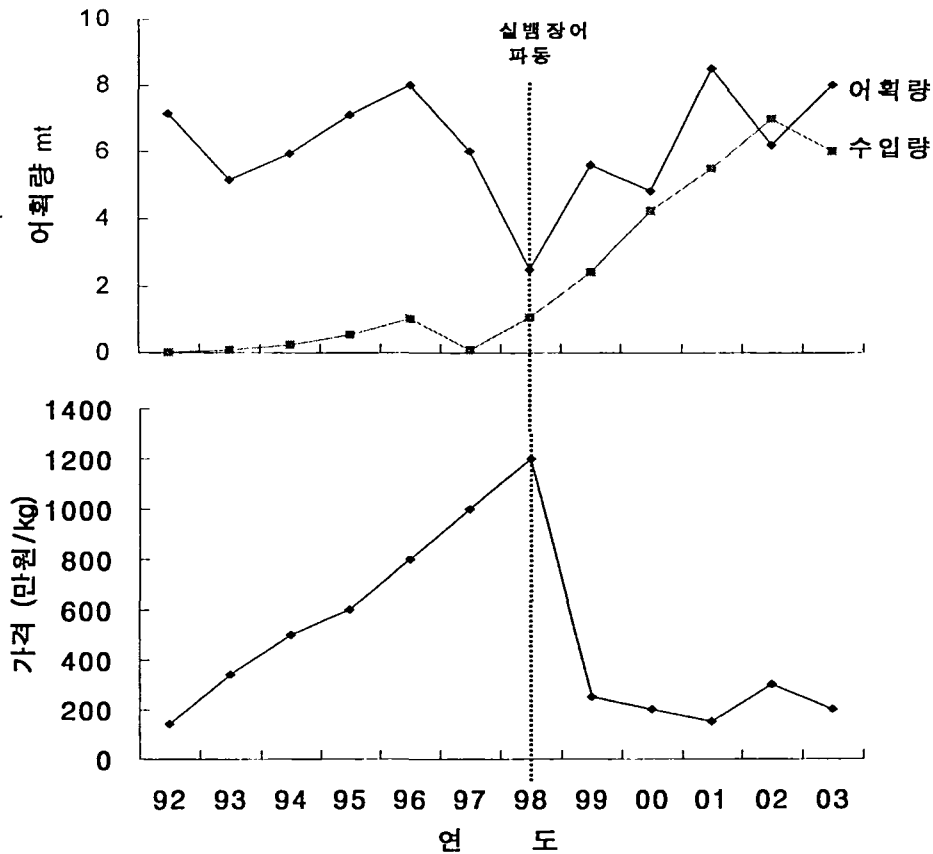


그림 2. 1992년에서 2003년 국내 실뱀장어 어획량, 수입량 및 가격 변동

실뱀장어 공급이 수요를 따르지 못하며, 1993년부터 국외산 실뱀장어가 수입되었다(그림 2, 표 1). 1998년 실뱀장어 입식을 하지 못한 양식장에서는 1999년 외국산 실뱀장어를 2.4 mt을 수입하였으나, 1999년 실뱀장어 채포량이 평년 이상을 유지하여 실뱀장어 가격이 300만 원 이하로 낮아졌다. 실뱀장어 채포 어민들이 무분별한 외국 실뱀장어 수입에 따른 가격 하락에 대하여 대책을 요구하였다. 국립수산과학원은 실뱀장어 수입량 허가 기관이지만 농수산물 수입 자유화 이후 실뱀장어 수입을 규제할 방안이 어려운 형편으로, 매년 2월말까지 수입을 허락하였다.

최근 4년간 실뱀장어 수출입 현황을 보면 (표 2), 국내 실뱀장어 소상시기 이전인 1999년 11월부터 2000년 2월 사이 4.2 mt가 수입되었다. 그러나, 2000년 1월부터 국내 실뱀장어가 잡히기 시작하였으나, 이미 상당량을 수입한 상태로 실뱀장어 가격이 200만 원 이하로 하락하여 일부 실뱀장어 어민들은 채포를 포기하였다. 그래도 4.8 mt이 잡혀 국내에서 필요한 2.8 mt을 제외한 2 mt는 낮은 가격으로 수출하였다. 2001년의 경우 국내 소상시기 이전 이미 5.5 mt를 수입하였으나, 2월 이후 8.5 mt가 잡혀 kg당 150만 원 이하로 3.0 mt를 대만으로 수출하였다. 그리고 남은 5.5 mt와 합쳐 국내에는 11.0 mt가 입식되었다. 2002년에는 7톤이 수입되었고, 국내에서는 6.2톤이 어획되었으며 대부분 국내에 입식되었다. 2003년에는 5톤이 수입되었고, 잡은 8 톤 중 1톤이 수출되어 총 13 톤이 입식되었다.

표 2. 2000-2002년 실뱀장어 어획량 및 입식량(양만 협동조합 제공, 단위 mt)

연도	수입	국내 생산량				국내 입식총량
		국내입식	수출	소계	단가 (만원/kg)	
2000	4.2	2.8	2.0	4.8	<200	7.0
2001	5.5	5.5	3.0	8.5	<150	11.0
2002	7.0	6.0	0.2	6.2	>250	13.0
2003	5.0	7.0	1.0	8.0	>250	13.0

실뱀장어는 양식 측면에서도 중요하지만, 양측성 어류의 자원 보전 및 관리 측면에서도 중요하다. 그러나 국내에서는 아직 실뱀장어 생태에 관한 연구가 미비한 편으로, 뱀장어 자원 관리를 위해서는 실뱀장어 전반에 관한 생태 연구가 절실히 필요하다.

3. 뱀장어 자원 관리의 방향

실뱀장어 문제는 국내 뿐 아니라 전 세계 뱀장어 시장의 주를 이루는 일본, 중국, 대만을 포함한 동아시아 4국에서도 같은 문제점을 가지고 있다. 뱀장어는 동북아시아 하천에 분포하며 산란장이 서북 태평양 상에 위치하는 국제 공동 자원으로, 아시아 4개국에서는 오래전부터 뱀장어 자원 공동 관리 필요성이 제기되어 왔다. 1998년 실뱀장어 파동 이후 1998년 11월 4개국의 뱀장어 전문 학자, 양식업자 및 관련 수산경영인 200여명이 동경

대 해양연구소에서 동아시아 뱀장어 자원 위원회(East Asian Eel Resources Consortium, EASEC)를 결성하고, 뱀장어 자원 공동 관리 방안을 협의하여 오고 있다. 매년 공동회의 및 심포지움을 개최하고 proceeding을 발간하고 있다.

- 1차 1998년 11월: 동경대 해양연구소. 발표논문 29편은 일본의 月刊 海洋 특집 18권에 'Life Cycle of Eels'라는 제목으로 출판되었다(Aida and Tsukamoto, 1999).

- 2차 1999년 9월: 동경대 해양연구소

- 3차 2000년 11월: 대만수산연구소. 발표논문 31편은 2001년 Journal of Taiwan Fisheries Research 9권 special volume에 'Sustainability of Resources and Aquaculture of Eels'라는 제목으로 발간되었다.

- 4차 2001년 9월: 동경대에서 일본 수산학회 70주년 기념의 심포지움으로 'Advances in Eel Biology'를 개최하였다. 이 심포지움에는 유럽뱀장어위원회 관련 전문가 및 전 세계의 주요 뱀장어 전문가들이 대부분 참가하였고, 발표 논문 33편을 묶어 2003년 9월 Springer 출판사에서 단행본 'Eel Biology'로 출판하였다(Aida *et al.* 2003)

- 5차: 2003년 10월 15일 서울: 2003년 제 12차 북태평양과학자회의(PICES)의 FIS topic session # 8 'Management of Eel Resources in East Asia'를 개최하였고, 29편의 논문이 발표되었고, 관리 대책을 협의하였다.

이 자원위원회 과정에서 뱀장어 자원 관리를 위해서 몇 가지 사항이 제안되었다.

◇ **자원 공동 관리:** 동북아산 실뱀장어의 과잉 어획과 성육장인 하천의 수질악화로 산란 회유하는 성어의 감소로 인하여 소상하는 실뱀장어가 감소하는 것으로 판단된다. 따라서, 실뱀장어 소상량을 늘릴 수 있는 자원 관리 방안이 필요하다. 이를 위해서는 자연산 뱀장어의 생태 및 자원량을 파악한 후 중장기 국제 공동 노력이 요구된다. 성어의 방류 및 자연산 뱀장어 어업 축소 등의 방안이 제시되었다. 참고로, 대만은 1965년부터, 일본은 1970대 초부터 양식성어의 일정 부분을 방류하는 사업을 지속하고 있다. 국내에서는 지자체에서 치어 방류 사업의 일환으로 뱀장어를 방류하고 있다

◇ **실뱀장어 소상량과 서북태평양 해류와의 관계:** 뱀장어 치어가 산란장에서 북적도 해류와 쿠로시오 해류를 따라 회유하기 때문에 서북태평양 해수 유동과 소상량과는 유의한 관계가 있을 것으로 보인다. 각국에서 실뱀장어 소상량 자료를 지속적으로 수집한 후 중장기 변동을 분석하고 서북태평양 해수 유동과의 관계를 파악하여 소상량을 예측할 수 있는 방안을 찾는다.

◇ **초기생활사 및 산란생태 조사:** 인공 부화 환경을 조성하기 위해서는 산란하는 자연산 뱀장어를 잡아 hormone 상태를 분석하여 인공 성숙한 뱀장어와 비교하여, 성숙 촉진 hormone의 보완 및 hormone 투여량 조절이 필요하다. 또, 자연산 알을 채집하여 알이 분포하는 수괴의 특성을 파악, 인공 부화된 치어의 환경을 조절할 필요가 있다.

◇ **뱀장어 치어 생산과 양식의 제문제 :** 일본을 중심으로 뱀장어 종묘 생산을 위해서 많은 노력을 기울이고 있으며, 2003년 일본에서는 실험실에서 종묘 생산에 성공하였다. 매년 그간의 중요생산을 위한 연구, 뱀장어 양식에 관련된 제문제의 결과를 발표하고 관련 정보를 교환하고 있다.

◇ **뱀장어 자원 관리 :** 아시아 4개국의 뱀장어 양식에 관련된 연구, 치어 생산 연구, 뱀

장어 초기 생활사 연구는 구미에 비하여 앞서 있으나, 자연 자원에 대한 연구는 미비한 실정이다. 특히, 하천의 오염, 하구 독의 건설 등으로 자원 자원이 크게 감소하였을 것으로 보이나, 이 생태 및 자원 현황에 대한 연구는 미비하다. 뱀장어 자원 관리 및 종다양성 보전을 위해서 자연 산 뱀장어 생태 및 자원학적 연구가 절실히 요구된다.

4. 국내의 전망과 연구 목적

국내에서도 동북아 뱀장어 자원 관리위원회의 제안에 따라 국제적인 공동노력이 필요하다. 그러나, 뱀장어 전문학자의 수도 적고, 자원 관리도 현실적으로 어려움이 많다. 특히, 서북 태평양 조사 및 산란장 조사에는 막대한 예산이 요구되어 쉬운 일은 아니다. 그렇다고, 양만업자나 실뱀장어 채포업자의 어려움을 그대로 방치할 수는 없고, 현실적으로 비교적 적은 노력으로 가능한 실뱀장어 소상량을 예측할 수 있는 기초 연구라도 수행할 필요가 있다.

뱀장어 치어는 쿠로시오를 따라 회유하기 때문에, 실뱀장어가 대만에는 11월에서 2월 사이, 일본 남부도서에는 12월에서 3월 사이 소상한다. 제주도에는 1월부터 한반도 남부 연안에 2월부터 하천을 오르기 때문에, 뱀장어의 초기 생활사를 어느 정도 파악하면 대만과 일본 남부, 혹은 제주도의 실뱀장어 소상 자료를 확보하면 한반도 주변의 소상량을 어느 정도까지는 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 3개 과제로 나누어 자료를 수집하여 분석하였고, 그 결과를 종합하여 소상량 예측 방안을 제시하고자 한다.

1) 뱀장어의 초기생활사(제 2 장)

- 산란장 주변에서 채집된 뱀장어의 체장분포와 이석의 미세구조를 이용한 산란일과 체장 조성 분석
- 한반도 하구역에서 채집된 실뱀장어의 체장 분포와 이석의 미세구조를 이용한 초기생활사 추정

2) 뱀장어의 소상생태 (제 3 장)

- 염색 표지 방류 방법을 이용한 제주 천제연 하구 실뱀장어 자원량 추정
- 금강 하구 실뱀장어 소상생태
- 수온 변동에 따른 실뱀장어의 생리적 반응

3) 실뱀장어 어획량 변동 (제 4 장)

- 아시아 4개국 실뱀장어 어획량 변화
- 국내 하구 실뱀장어 채포량 중장기 변동
- 위의 결과들을 종합하여 실뱀장어 소상량을 예측할 수 있는 방안을 제시

제 2 장 뱀장어의 초기 생활사

제 1 절 산란장 주변해역에서 채집된 뱀장어의 체장 분포와 이석의 미세구조를 이용한 산란일과 체장 성장

1. 서론

뱀장어(*Anguilla* spp.)는 민물에서 자라지만 바다에서 산란하여 치어기를 바다에서 보낸다. 육수에서 성장을 마치고 알을 낳을 때가되면 바다로 회유하여 산란하고 죽는 것으로 알려져 있으나, 성숙란을 가진 어미와 알이 채집되지 않아 산란생태는 구체적으로 알려져 있지 않고 있다. 뱀장어의 이러한 특이한 생활사 때문에 20 세기 초부터 뱀장어의 생태에 대한 많은 연구가 수행되었으나 아직 밝혀지지 않은 부분이 많다. 하구에서 멀지 않은 바다에서 산란 회유하는 뱀장어는 채집되었지만(Tsukamoto *et al.* 1998) 자연 상태에서는 아직 생식소가 성숙한 뱀장어가 채집되지 않아 산란 생태는 구명되지 않았다. 실험실에서 산란, 부화에 성공한 이래 (Yamamoto and Yamauchi, 1974; Yamauchi *et al.* 1976), 많은 연구가 수행되어 치어 사육에는 성공하였고(Tanaka, 1999), 2003년 실험실에서 실뱀장어로 변태 후 유어 상태까지 성공한 것으로 보고되었으나, 아직 종묘 대량 생산까지는 많은 연구가 요구된다.

동북아시아산 뱀장어 *Anguilla japonica*는 필리핀 북부, 대만, 중국, 한반도 및 일본에서 성장한다. Matsui (1957)가 처음으로 산란장을 제시한 이래, 1973년에서 1989년 사이 동경대 해양연구소를 중심으로 서북태평양에서 자료가 축적되며 산란장은 Matsui가 추정해역보다 훨씬 남동부일 것이라는 증거 자료를 수집하였다(Tabeta and Takai, 1975; Tanaka, 1975; Tabeta and Konishi, 1986; Kajihara, 1988; Ozawa *et al.* 1989). 1991년 6-7월 동경대 해양연구소는 북위 15도, 동경 140도 주변의 북적도 해류와 쿠로시오 환류 중심 수괴가 만나는 전선(front) 해역에서 10 mm 미만의 뱀장어 다수를 채집하여, 이 해역을 산란장으로 추정하였다 (그림 3, Tsukamoto, 1992). 그 이후 정확한 산란장으로 140도 근해 해산이라는 이론이 제기되었으나(Fricke and Tsukamoto, 1998), 1998년 잠수정으로 수심 400 m까지 잠수정으로 정밀 관찰하였고, 2001-2002년에는 심해 카메라로 해산 주변의 수심 2,000 m까지 조사하였으나 아직 정확한 산란의 징후는 찾지 못하였다.

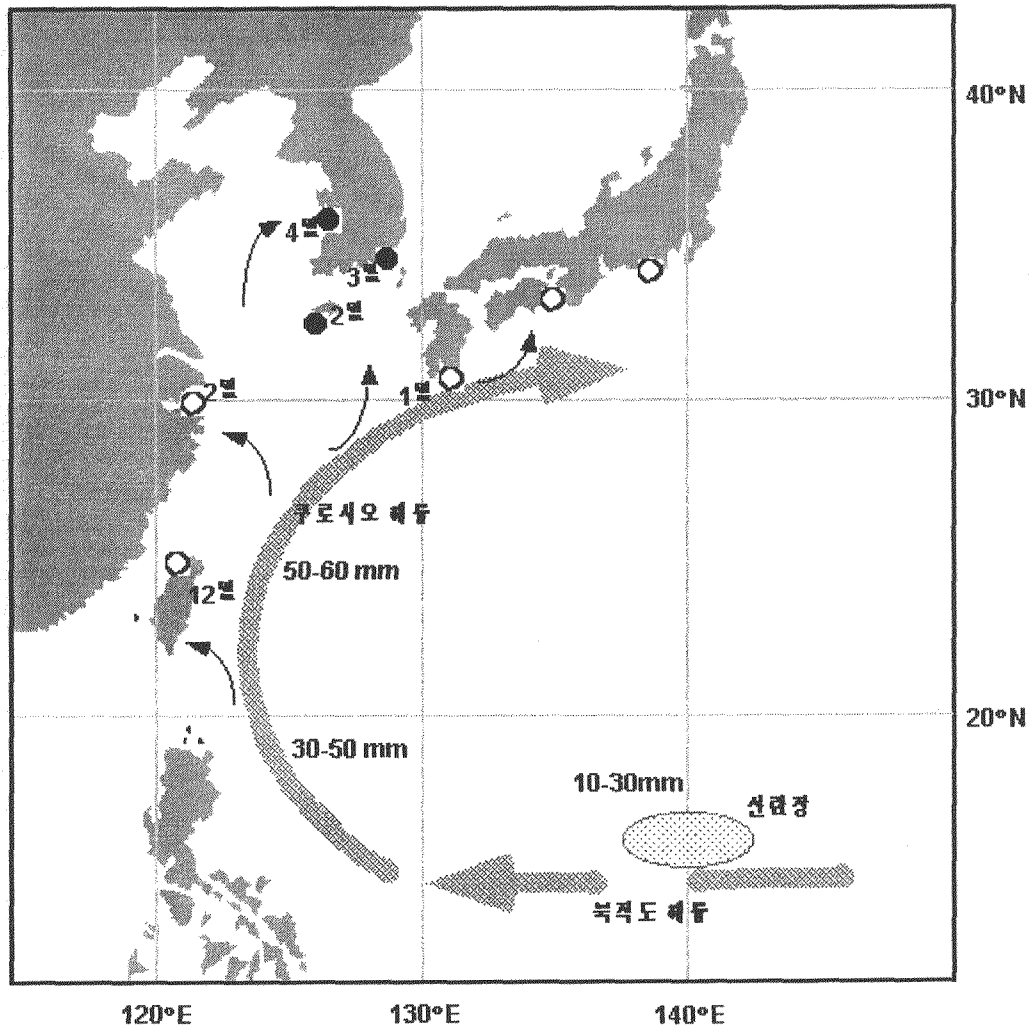


그림 3. 뱀장어 치어의 회유로. 길이 (mm)는 지금까지 그 해역에서 채집된 뱀장어 치어의 전장. 해안선의 월은 실뱀장어의 최대 소상시기로, 이 보다 2달 전에서 2달 후까지 소상한다.

뱀장어 산란장 추정을 위한 대규모 대양 조사와는 별개로 수행된 이석의 미세구조에 대한 연구결과는 뱀장어 산란장 추정에 크게 기여하게 되었다. 어류의 이석에 하루주기 성장선 (日輪, daily growth increments)이 형성됨이 밝혀진 이래(Pannella, 1971) 이 성장선은 어류의 초기생활사를 밝히는데 널리 이용되고 있다. 치어 이석의 일륜의 수는 부화 이후 채집된 날까지 경과일과 같으므로 산란기를 추정할 수 있고, 이석의 성장은 체장의 성장과 비례하기 때문에 일륜 개개의 폭으로부터 일일주기 성장율을 추정할 수 있다. 이외에도 이석의 성장은 각 개체의 생리적 리듬과 밀접한 관계를 보이므로 이를 이용하여 한 개체의 과거 생리리듬을 추정할 수 있는 등 어류의 생리 및 생태 연구에 널리 이용되고 있다 (Campana and Neilson, 1985; Jones, 1986). 이러한 장점에도 불구하고 치어 이석은 그 크기가 수십-수백 μm 정도 밖에 되지 않아 다루기가 쉽지 않다. 또, 개개 일륜의 폭은 광학현미경의 해상력보다 작은 경우($<1\mu\text{m}$)가 많아 이석 일륜이 어류 생태 연구에 좋은 자료임을 알면서도 그 이용이 보편화되지 못하고 있다. 멸치 이석과 같은 경우는

전처리 없이 현미경에서 직접 관찰하여도 비교적 쉽게 일련을 관찰할 수 있지만 대부분의 어류 이석은 전처리 없이 미세구조를 관찰하기 어렵다. 이석의 미세구조를 관찰하기 위해서는 핵을 지나는 면을 만들어 주사전자현미경으로 관찰하면 관찰 오차를 최소화 할 수 있다. 그러나, 치어 이석의 핵은 수십-수백 μm 정도 크기 이석 내부 3 차 공간상의 10 μm 내외의 한 점이기에 때문에 핵 근처를 지나는 면을 만들기가 쉽지 않다. 본인은 기존의 이석 처리 방법을 수정 보완하여 만족한 결과를 얻었으며(Lee and Lee, 1989; Lee and Byun, 1996; Lee and Kim, 2000), 뱀장어에도 적용하여 연구를 수행하고 있다.

2. 재료 및 방법

자료는 1991, 1994, 1995, 1998, 2002년 동경대학 해양연구소 Hakuho-Maru 조사선이 산란장 조사 중 근해에서 채집된 뱀장어 자료를 이용하였고, 1998년의 경우는 Suruga-Maru의 자료도 이용하였다(표. 3). 조사는 10-22 °N, 130-155 °E 범위에서 해에 따라 달랐으며, 뱀장어가 채집된 해역은 10-20 °N, 130-144 °E의 범위였다(표 3). 조사 시기는 5월 하순에서 9월말까지였으며, 대부분의 실뱀장어는 6-7월에 채집되었고, 일부가 9월에 채집되었다(표 3). 1991년 자료 중 일부는 Tsukamoto *et al.* (1993a, b)에, 1998년 일부 자료는 Ishikawa *et al.* (2001)에 발표되었다.

표 3. 뱀장어 산란장 조사와 각 조사 기간 중 채집된 뱀장어 마리수와 이석 표본 수

연도	조사 시기	조사 범위	총채집 개체수	표본 채집시기	이석 관찰수	비고
1991	June 14- July 4	10-22°N, 137-155°E	886	July 1-3	46	
	July 12 -22	10-22°N, 130-134°E	71	July 15-16	13	
1994	June 16-July 7	10-17°N, 134-141°E	767	June 21-Jul y 2	28	
1995	July 7-30	11-20°N, 131-142°E	123	Jul 24-30	0	
	Sept.15-27	11-15°N, 139-142°E	7	Sept 21-25	0	
1998	May 22-June 2	13-20°N, 141-143°E	24	June 10-27	5	
	Aug.17-Sept.14	13-18°N, 137-144°E	12	Sept 3-5	12	Suruga
2001	July 5-Aug.15	13-17°N' 137-144°E	25	July 15-24	10	

뱀장어는 잡은 즉시 형태 및 근절수를 헤아려 종을 확인하고 전장을 측정하였고, 이석 관찰 표본은 100% 에탄올에 보관하였다. 이석의 미세성장선 관찰을 위한 전 처리는 Lee and Lee (1989) 및 Lee and Byun (1996)의 방법에 따랐다. 준비된 이석은 광학현미경에서 관찰하면서 체측에 평행한 면을 사포(silicon carbide paper) 400, 800, 1표 00목(grit)으로 연마하고 연마포에서 1.0, 0.3 μm 의 alumina powder로 핵을 지나는 시상면(sagittal plane)까지 연마하고 광택을 내었다. 이석의 외부형태 및 미세구조는 광학현미경(100, 200, 500)의 반사광과 투사광을 이용하여 관찰하였고, 이석의 장반경은 가장자리가 가장 잘 보일 때 광학현미경의 대안측미계(ocular micrometer)로 측정하였다. 이석의

미세성장선은 폭이 좁아 성장선 판독은 주사전자현미경(SEM: Scanning Electron Microscope)으로 관찰하였다. 주사전자현미경으로 관찰할 이석은 연마면을 0.3%의 염산 용액으로 3~5초 동안 etching한 후 증류수로 세척하여 건조시켰다. 그 후 gold-palladium 도금(진공도: 0.01-0.05 Torr, ion current: 5 mA, 도금시간: 6~8 min)을 한 후 1000, 2000, 4000 배 등에서 관찰하였다. 동북 아시아산 뱀장어 이석의 성장선은 부화 이후 하루주기로 형성됨이 밝혀졌기 때문에 (Lee and Lee, 1989; Umezawa et al. 1989), 이석의 장선수로부터 산란기를 역추산하여 추정하였다 (Tabeta et al. 1987; Tzeng, 1990; Tsukamoto, 1990).

이석을 관찰한 표본은 채집된 전체 뱀장어 중 일부이기 때문에, 체장의 성장식으로부터 채집된 전체 실뱀장어의 산란일을 추정하였다.

3. 결과

가. 체장 조성

조사 기간 동안 산란장 주변에서 채집된 전체 뱀장어의 체장 분포는 그림 5와 같다. 1991년의 경우 Leg. 1에서는 7월 1-4일 사이 총 886 마리가 채집되었으며, 7.7-33.4 mm의 범위였으며, 3 무리 체장 그룹으로 구분되었다. 7-17 mm 사이의 작은 개체들이 대부분을 차지하였고, 20-27 mm 범위에 중간 크기 개체들이 그리고 전장 33.4 mm 한 마리가 채집되었다. 약 15일 후인 Leg. 2에서는 7월 15-17일 사이에 71 마리가 채집되었으며, 체장 범위 16-22 mm와 23-33 mm의 두 무리로 나뉘어졌다.

1994년에는 6월 21-26일 사이에는 체장 13-27 mm의 범위에서 747 마리가 채집되었고, 6월 27일에서 7월 2일 사이에는 11-13 mm 체장 범위에서 2마리, 22-27 mm 범위에서 17 마리, 31 mm 한 마리가 채집되었다.

1995년 7월과 1998년 6월의 경우도 1991년이나 1994년과 같이 10-36 mm 전장 범위에서 3개의 체장군으로 분리되었다. 그러나, 1995년 9월 하순에는 채집된 개체들이 29-40 mm의 범위로 작은 개체들이 채집되지 않았고 1998년 9월 초순 수행된 Suruga Maru 조사에서는 21-38 mm 범위 체장 개체들이 잡혀 6-7월의 개체들보다는 컸고, 9월 하순 보다는 작았다.

2001년에도 산란장 조사를 수행하였으나 그 조사는 동경 142도 상에 위치한 마리아나 해산 (Mariana Ridge)에서 이루어졌으나, 뱀장어는 한 마리도 채집되지 않았다. 2002년에도 142도 상의 해산 주변에서는 한 마리도 채집되지 않았고 주로 동경 137도 선상에서 17도 선상에서는 20 mm 이상의 큰 개체들이 채집되었고 13도 상에서는 13 mm 미만의 작은 개체들이 채집되었다.

나. 산란기

뱀장어 이석의 시상면(sagittal plane)을 SEM으로 관찰하면, 핵은 직경 약 10 μ m 정도로 염산 깊게 부식된다(그림 4). 이 핵 주변에는 미세성장선이 불분명한 폭 약 5 μ m 정도의 고리가 관찰되고, 그 외부에 명확히 구분되는 미세성장선이 동심원상으로 배열되어 있다. 핵의 폭은 Umezawa et al.(1989)가 실험실에서 부화한 뱀장어 이석의 크기와 같아 부화 때 생긴 것으로 보이며, 그 외부의 두꺼운 고리는 난황자어기 때 생성된 것으로 추정

되어 preleptocephalus zone로 정의되었으며 평균 10개의 불분명한 미세성장선이 관찰된다. 난황을 흡수한 이후 먹이를 먹기 시작하면서 뱀장어에는 주기적으로 일륜이 형성되는 것을 알 수 있다. 1991년 조사의 Leg.1 중 7월 1-3일에 추출된 표본은 평균전장(±SD) 12.4±1.59 mm와 22.8±1.20의 두 체장 무리로 구분되었다(그림 5). 이로부터 약 15일 후인 Leg. 2 중인 7월 15-18일 추출된 표본은 평균전장(±SD) 18.5±1.14 mm와 28.9±1.98 mm의 두 체장 무리로 구분되었다. 한 조사시기의 두 무리의 평균 체장 차이는 약 10 mm였고, 두 조사기간 사이 즉 15일간의 각 체장 무리의 평균 체장 차이는 약 5 mm로, 각 시기 두 체장 무리가 약 한 달 간격으로 태어났음을 시사한다. 이석의 일륜수로부터 역추산한 산란기는 조사 시기에 관계없이 큰 체장 무리는 5월 그믐, 작은 체장 무리는 6월 그믐 전후였다.

1994년에는 6월 22일부터 7월 사이에 표본이 추출되어 체장분포는 넓은 범위를 보였으나, 산란일은 5월 그믐이었고 범위는 1991년에 비하여 넓은 편이었다. 1998년에는 7월과 9월의 표본에서는 산란기는 5-7월 사이의 그믐 전후였고, 2002년의 경우도 5-7월 그믐이었다.

新月産卵理論

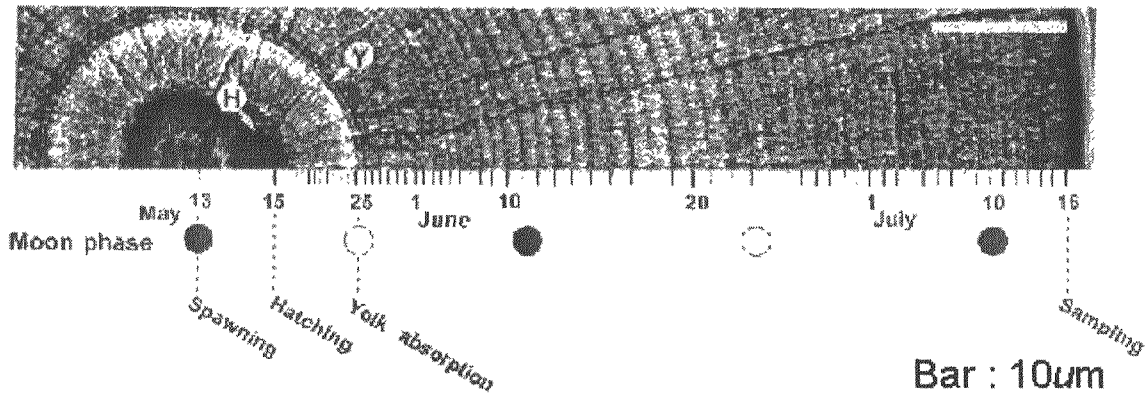


그림 4. 1991년 7월 16일 산란장 근해에서 채집된 뱀장어 이석의 미세구조. 채집일에서 일륜수를 뺀으로써 난황흡수일(Y), 부화일(H) 및 산란일을 추정할 수 있다.

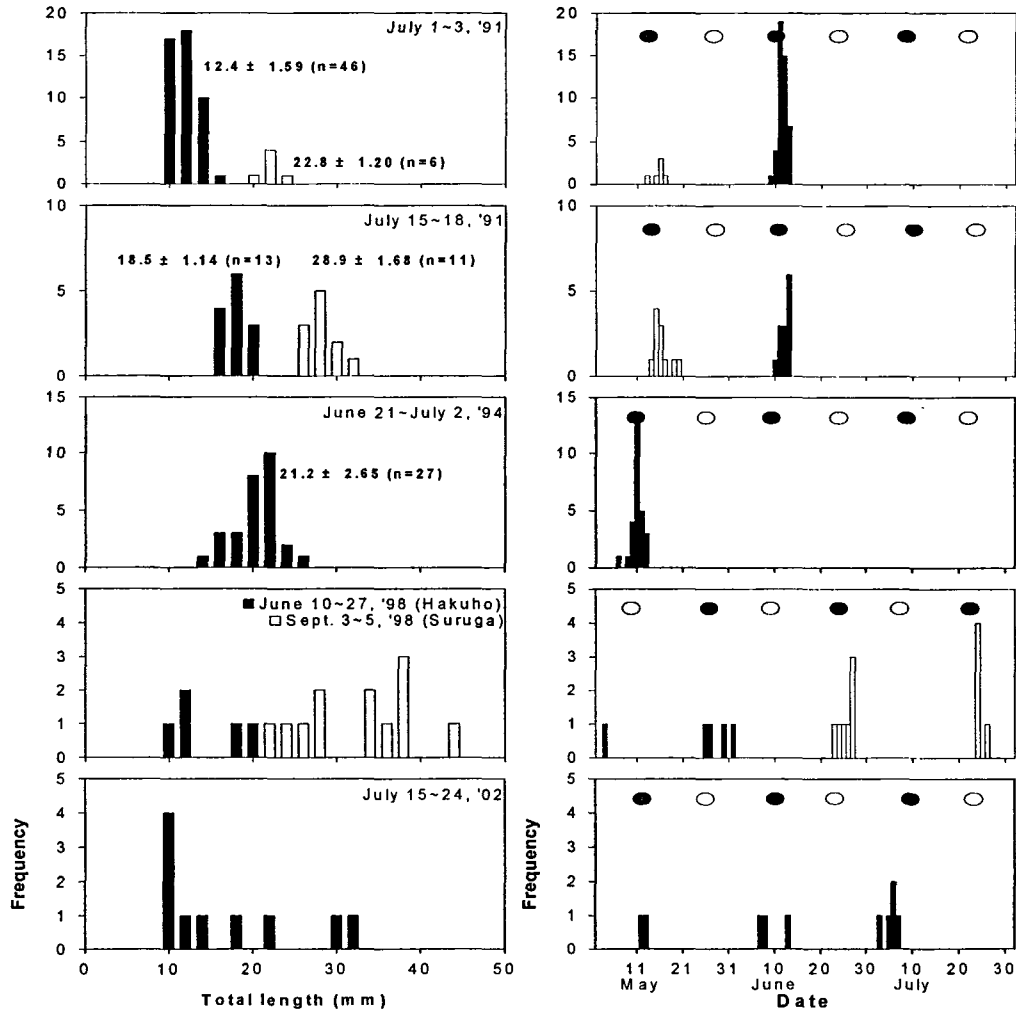


그림 5. 1991년에서 2002년 사이 뱀장어 산란장주변에서 채집된 뱀장어 이석 관찰 표본의 전장 분포(좌)와 이석의 일륜수로부터 추정한 산란기(우)

다. 체장과 이석의 성장

1998년 7월과 9월에 채집된 뱀장어의 체장 범위는 10.0-43.2 mm로 조사 기간 중 가장 넓어 이 자료를 이용하여 체장과 이석 장반경과의 관계를 추정하였다. 전장(L)과 이석 장반경(R)은 $L = 0.48 R + 2.26$ ($r^2=0.96$)로 일차식으로 유의하게 회귀되었다(그림 6).

이 뱀장어의 나이는 12-75일의 범위로, 체장(L)은 나이(t)에 대하여,

$$L = 0.45 t + 3.97 \quad (r^2=0.94)$$

로 유의하게 회귀되어(그림 7) 뱀장어는 초기에 일일 평균 0.45 mm/d로 자라는 것을 알 수 있다.

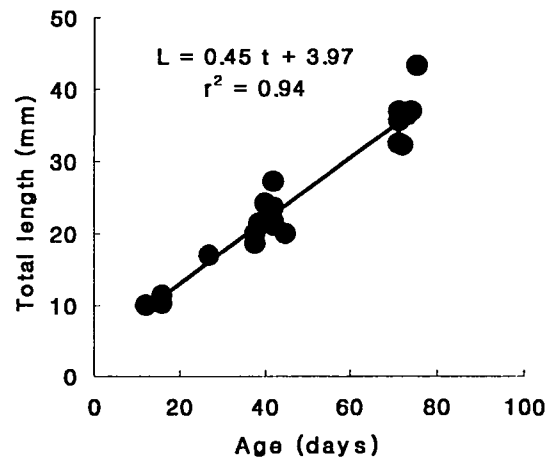
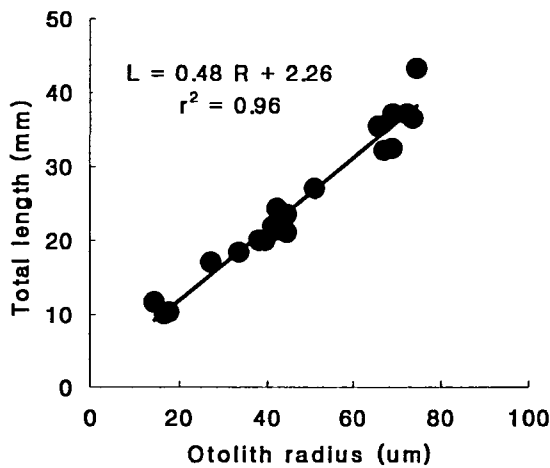


그림 6. 1998년 7월과 9월 산란장 주변에서 채집된 뱀장어의 전장(L, mm)과 이석장반경(R, μm)과의 관계식

그림 7. 1998년 7월과 9월 산란장 주변에서 채집된 뱀장어의 전장(L, mm)의 나이(t, days)에 따른 성장식

라. 뱀장어 체장과 일륜수로부터 추정된 산란기

그림 8에 각 조사 시기 채집된 뱀장어의 체장 범위를 도시하였다. 체장의 성장은 1차식으로 유의하게 되었고, 일일성장률이 평균 0.45 mm/d였기 때문에 이 성장률을 이용하여 각 조사 시기 채집된 전체 뱀장어의 산란기를 추정하였다.

1991년의 경우 이석을 관찰한 범위의 뱀장어의 산란기는 5월에서 6월 그믐 전후였고, 이석을 관찰하지 못한 33.4 mm 뱀장어의 산란기는 4월 그믐이었다. 다른 조사 시기의 경우도 산란기는 5월에서 7월 사이였다.

이상을 종합하면 지금까지 산란장 주변에서 채집된 뱀장어의 산란기는 4월 말에서 7월 중순 사이임을 알 수 있다. 지금까지 뱀장어는 5월에서 9월 사이에 채집되었고, 조사 해역도 동경 130-144도 사이로 연중 계속 보다 넓은 해역에서 자료를 수집하였을 경우 산란기는 이 보다 길어질 수도 있다. 그러나 1991년의 경우 조사 범위가 동경 131-155도, 북위 10-22도 사이로 충분히 넓었으나 뱀장어는 131-137도 사이에서만 채집되었고, 1998년 9월에 채집된 뱀장어는 그 전장이 30 mm, 나이가 60일 이상인 개체들만이 채집되어, *A. japonica*의 산란기는 본 조사에서 추정된 범위를 크게 벗어나지 않을 것으로 추정된다.

본 연구에서 추정된 산란기는 4월에서 7월 사이 모두 그믐 전후였다. 연안 어류나 무척추 동물들이 그믐 전후 산란하는 것은 많이 알려져 있으나, 해양어류에서 그믐 산란을 보고된 것이 별로 없다. 이것은 해양의 경우 자료 수집이 어려워 충분한 자료가 축적되지 않은 것도 한 이유로 보인다. 뱀장어는 야행성이고, 그믐 전후 활발하게 행동하는 것은 실뱀장어나 산란을 위해 하구를 떠나는 은뱀장어(silver eels)에서 잘 알려져 있다. 뱀장어는 10월에서 12월 하구를 떠나 5-9개월에 수 천 km를 회유하여 산란장에 도달하는 것을 알 수 있다. 뱀장어가 sea mounts 등 한곳에 모여 산란하는지 원양의 중층에서 산란하는지는 아직 구체적으로 알려져 있지 않다. 넓은 3차원의 바다에서 산란할 경우, 수정 확률을 높이기 위해서는 동시 산란, 방정이 필요하다. *A. japonica*의 산란장으로 알려진 북적

도 북단의 염분전선은 두 해류가 만나 수렴하여 해수가 하강하는 곳으로 일차생산력이 낮고 투명도가 높은 바다이다. 따라서 어두운 그믐 때를 이용하여 산란함으로써 알들의 피식 확률을 낮출 수 있을 것으로 추정된다. 뱀장어의 그믐 동시 산란 (synchronized spawning during the new moon)은 넓은 해양에서 수정확률을 높이고 알과 자어의 피식 확률을 높이는 생존 전략으로 판단된다.

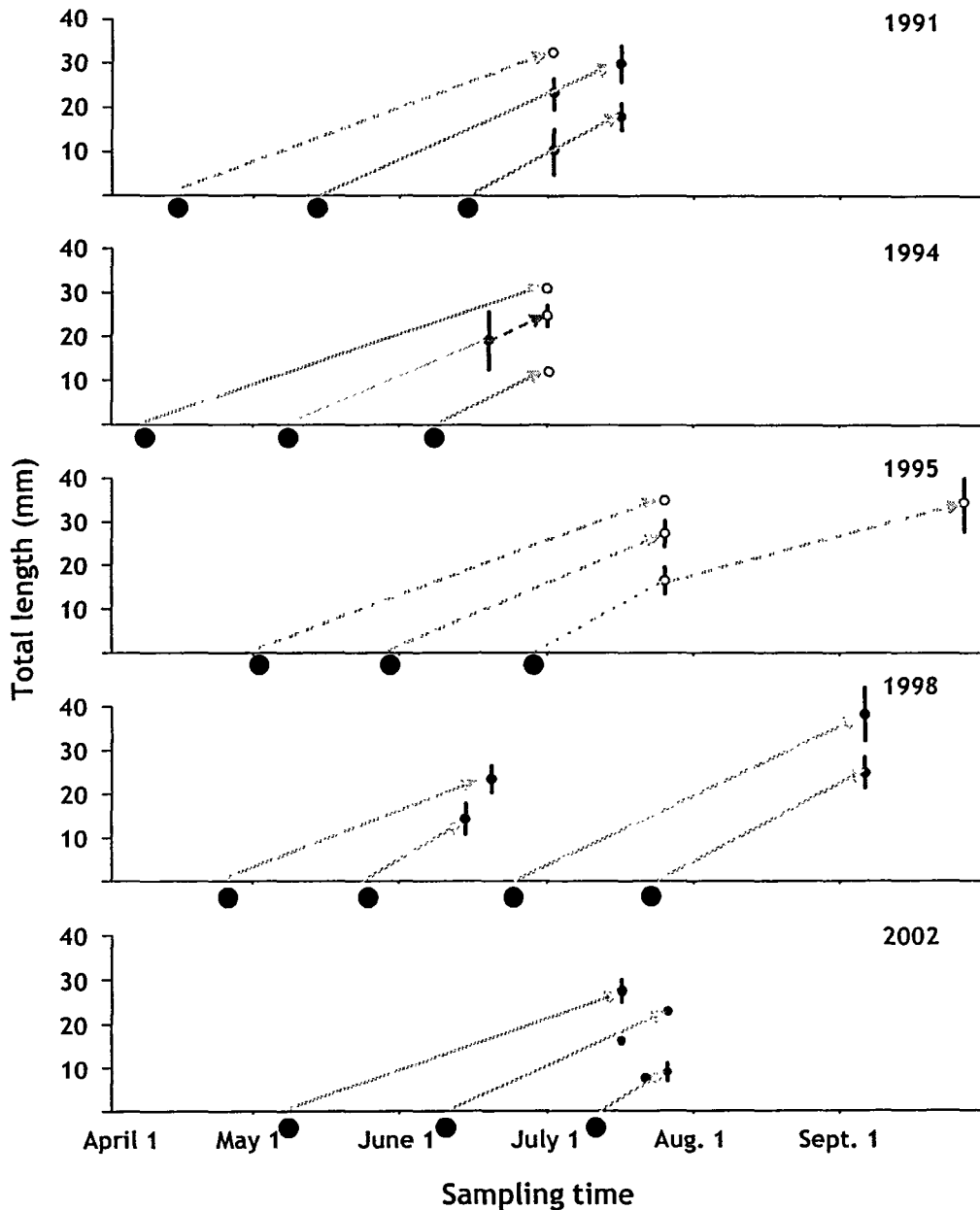


그림 8. 1991년에서 2002년 사이 뱀장어 산란장주변에서 채집된 전체 뱀장어 채집시기별 전장 범위와 이석 관찰 표본으로부터 추정된 산란기(실선)와 이석을 관찰하지 못한 표본들은 체장 성장식으로부터 산란기 추정(점선)

제 2 절 한반도 하구에서 채집된 실뱀장어의 체장 분포와 이석의 미세구조를 이용한 초기생활사

1. 서 론

뱀장어는 쿠로시오를 따라 회유하여 대만-오끼나와 부근에 이르면 실뱀장어로 변태한 후 대륙붕을 따라 회유하여 강하구에 도달하는 것으로 알려져 있다. 그러나, 뱀장어는 북적도 해류와 쿠로시오 해류에서 채집되었고 변태과정 중의 뱀장어는 지금까지 총 15 개체가 채집되었다(Tabeta and Takai, 1975; Tsukamoto et al., 1992, 1995; Minagawa, 2001). 변태를 마친 초기단계의 실뱀장어는 황해 동중국해 해역에서 지금까지 총 9 개체만이 보고되었을 뿐이다(Tabeta and Takai, 1973; Shojima, 1990). 이와 같이 뱀장어의 변태기부터 실뱀장어 초기 단계의 자료가 부족하며, 대부분 외부형태 서술에 그쳐 이 기간동안의 생애는 거의 알려져 있지 않으며 대서양산 뱀장어에서도 같은 실정이다(Tabeta and Takai, 1975; Tsukamoto et al., 1992; Tabeta and Takai, 1973; Shojima, 1990).

실뱀장어는 뱀장어와 달리 소상하는 하구에서 비교적 쉽게 충분한 시료를 구할 수 있어, 이석의 미세구조를 이용한 초기생활사 연구가 1980년대 후반부터 지속되어 오고 있다(Tabeta et al., 1987; Tsukamoto, 1990; Umezawa and Tsukamoto, 1990; Tzeng, 1990; Tzeng and Tsai, 1992; Cheng and Tzeng, 1996; Arai et al., 1997). 이러한 연구에서 실뱀장어 이석의 미세성장선 수가 실뱀장어 나이와 같다고 보고 추정된 산란기는 5월에서 11월까지로 산란기간이 6개월 이상이었으며, 연구자 및 채집시기에 따라 산란시기가 다르게 추정되고 있다.

뱀장어 이석의 미세성장선은 실뱀장어 이석에 비해 비교적 명확하며 핵 부분부터 가장자리까지 판독이 가능하여 정확한 나이를 추정할 수 있으며(Tsukamoto et al., 1998; Lee, 1999) 이석의 부화정지선부터 가장자리까지 일륜수가 수 십일에 불과하기 때문에 이 일륜수를 이용한 산란기 추정에는 거의 오차가 없을 것으로 판단된다(Ishikawa et al., 2001). 그러나 뱀장어보다 일정기간이 지난 실뱀장어 이석으로 추정한 산란기는 뱀장어로 추정한 산란기보다 더 넓고 수개월 뒤로 늦어지며 채집시기 및 연구자에 따른 변이가 커서, 실뱀장어 이석으로 정확한 산란기를 추정하는데 문제점이 내포되어 있음을 암시하고 있다(Lee, 1999; Cieri and McCleave, 2000).

한국 하구역 실뱀장어의 생애에 관한 연구는 미비한 편으로, 제주도 천제연, 낙동강, 금강에서 주 소상시기 동안 월별로 채집한 실뱀장어의 전장조성과 색소발달단계(pigment developmental stage) 변동을 분석하였다. 하구역간 연도별 변화는 다음 장에서 다룬다.

실뱀장어 이석의 미세성장선을 분석하고, 기존 실뱀장어 이석 미세성장선 자료들과 비교하여 실뱀장어 이석을 이용한 산란기 추정의 문제점을 제시하였으며, 실뱀장어 이석 미세구조를 이용하여 추정할 수 있는 뱀장어의 초기생활사 부분을 제시하였다.

2. 재료 및 방법

실뱀장어 재료는 1998년, 2001-2003년 4년간 한국의 제주도 천제연, 낙동강 그리고

금강 하구 세 곳에서 실뱀장어 주 소상 시기 3개월 동안 채집되었다. 해에 따른 체장, 색소발달단계 및 나이의 변화가 거의 없어 1998년 자료를 분석하였다. 실뱀장어는 조류가 강하고 어두운 밤에 활동성이 강하므로 각 월의 그믐 때 채집하였다. 제주도 천제연 하구에서는 손전등으로 빛을 비추고 뜰채(dip nets)를 이용해 채집하였다. 채집에 이용된 뜰채는 망직경이 20 cm 정도이며 망목(stretched mesh width)은 1 mm 이었다. 낙동강과 금강에서는 실뱀장어 개량 안강망(bag-net)으로 채집하였는데 그물 길이는 약 40 m 였고 망입구는 20×3 m²으로 망목은 1 mm 였다.

실뱀장어의 색소발달단계(pigmentation stage)는 몸체 표면 색소 분포에 따라 결정하였다(Bertin, 1956). 이석의 처리 및 관찰은 앞질의 뱀장어에서와 같은 방법을 이용하였다. 채집시기와 채집장소에 따른 실뱀장어의 전장, 장반경, 일륜수, 변태를 시작할 때의 장반경과 일륜수 비교는 분산분석(two-way ANOVA)검정을 하였으며 이와 관련한 통계 처리는 SPSSPC⁺를 이용하였다(Norusis, 1986).

3 결과

1998년, 2001-2003 년 시기별로 채집한 실뱀장어는 해에 따른 형태 형질 차이가 유의하지 않아(그림 9) 1998년 자료만을 비교 분석하였다.

가. 전장 분포

1998년 1월부터 3월까지 제주도에서 채집한 실뱀장어의 전장은 50.4~62.0 mm 범위였으며, 평균 전장(mean±SD)은 1월이 56.6±1.72 mm, 2월이 58.3±2.22 mm, 3월이 56.9±1.93 mm로(그림 10), 2월의 평균 전장이 1, 3월에 비하여 유의하게 컸다($p < 0.05$, 표 4),

낙동강에서 실뱀장어의 전장은 52.0~62.0 mm 범위였으며, 평균 전장(mean±SD)은 2월이 58.3±2.06 mm, 3월이 57.2±1.70 mm, 4월이 56.5±2.14 mm로(그림 10), 2월의 평균 전장이 3, 4월에 비하여 유의하게 컸고 3월과 4월은 유의한 차이를 보이지 않았다($p < 0.05$, 표 4).

금강 실뱀장어의 전장은 52.0~62.5 mm 범위로 낙동강과 비슷하였으며, 평균 전장(mean±SD)은 2월이 57.2±1.92 mm, 3월이 57.2±1.89 mm로 평균이 유의한 차이를 보이지 않았고, 4월에는 56.1±2.17 mm로(그림 10) 2-3월에 비하여 유의하게 작았다($p < 0.05$, 표 4).

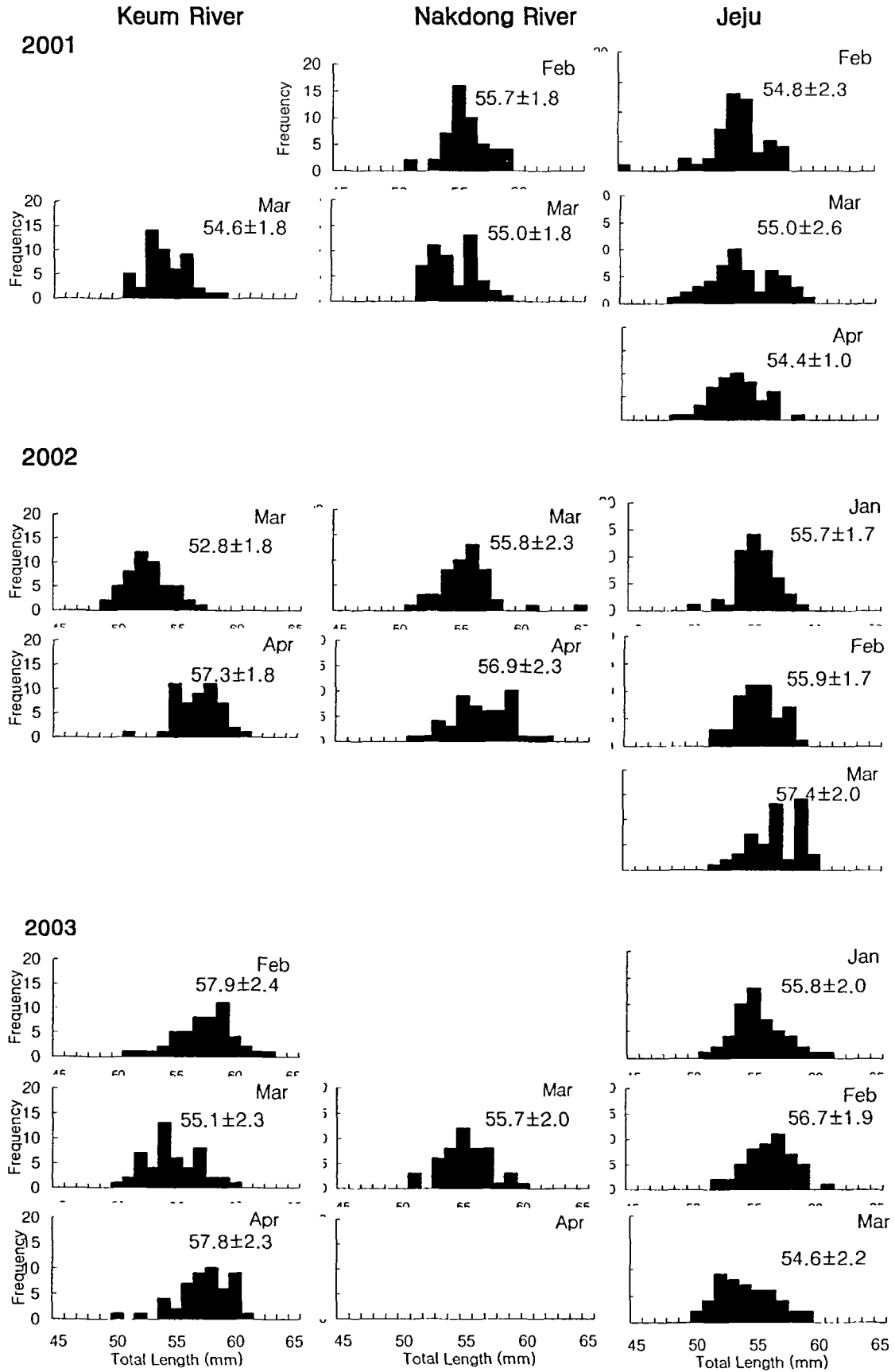


그림 9. 2001년부터 2003년 사이 제주 천제연, 낙동강 및 금강 하구에서 주 소상시기 동안 채집된 실뱀장어의 체장 분포.

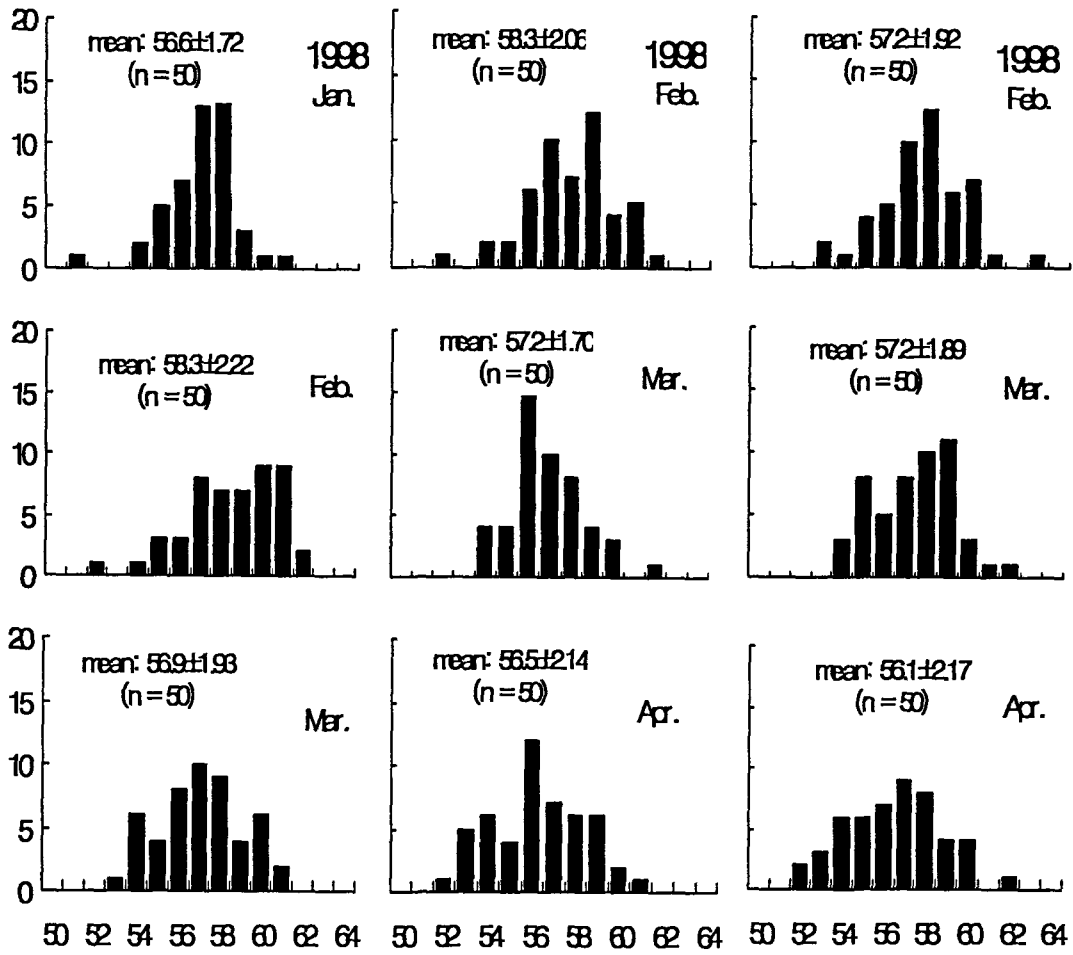


그림 10. 1998년 실뱀장어 주소상시기 동안 천제연, 낙동강 및 금강 하구에서 월별로 채집한 실뱀장어의 체장 변화

표 4. 천제연, 낙동강 및 금강 하구에서 월별로 채집한 실뱀장어 평균 전장의 채집 시기간 비교. t-test, S: significant, NS: not significant

Sampling site	Month	Cheonjeyeon			Nakdong R.		Kuem R.	
		Jan.	Feb.	Mar.	Feb.	Mar.	Apr.	Feb.
Cheonjeyeon	Jan.							
	Feb.	S						
	Mar.	NS	S					
Nakdong R.	Feb.	S	NS	S				
	Mar.	NS	S	NS	S			
	Apr.	NS	S	NS	S	NS		
Kuem R.	Feb.	NS	S	NS	S	NS	NS	
	Mar.	NS	S	NS	S	NS	NS	NS
	Apr.	NS	S	NS	S	S	NS	S

표 5. 천제연, 낙동강 및 금강 하구에서 월별로 채집한 실뱀장어
평균 전장의 채집 하구와 채집 시기간 F-test 비교.

Source	SS	DF	MS	F	p
Sampling site	18.96	2	9.48	2.42	0.090
Sampling time	185.74	3	61.91	15.8	0.000
Sampling (site * time)	30.33	3	10.11	2.58	0.053
Error	1727.27	441	3.91		
Total	1470337	450			

SS: sum of square

DF: degree of freedom

MS: mean square

1998년 제주도, 낙동강, 금강에서 월별로 3개월씩 채집한 전체 실뱀장어의 전장은 50.4~62.5 mm 범위였으며 평균은 57.1 ± 2.09 mm 였다. 각 하구에서 시기별로 채집한 실뱀장어 전장의 평균은 시기 간에는 차이가 있었으며(F-test: $p < 0.05$), 지역간에는 차이가 없었다($p > 0.05$, 표 5). 그러나 전장자료를 월별로 비교해 보면, 제주도와 낙동강의 2월 전장이 다른 시기의 전장보다 유의하게 컸으며, 금강 4월의 전장은 제주 2월, 낙동강 2월과 3월, 금강 2월과 3월의 전장보다 유의하게 작았다.

나. 색소 발달 단계 분포

색소 발달단계는 VA에서 VIAIII 단계까지 관찰되었다. 제주도 하구에서 채집된 실뱀장어의 색소발달단계는 낙동강하구와 금강하구의 것에 비해 분포 범위가 넓었다(VA~VIAIV). 제주도에서 1월에는 VIAI 단계가 많았지만 2월과 3월에는 VB 단계에서 최빈값을 보였다. 낙동강과 금강에서는 채집시기에 따라 색소발달단계가 높아졌다. 2월에는 색소발달의 초기 단계인 VA가 주를 이루었지만 3월에는 VB 단계의 비율이 높아졌으며 4월에는 색소발달단계가 넓은 범위를 보였고, 높은 색소발달단계 개체 비중이 높아졌다(그림 11).

색소발달단계에 따른 평균전장의 변화는 VA단계에서 VIAI 또는 VIAII 단계까지 전장이 줄어들다가 그 이후부터는 전장이 약간 증가하는 추세였으나 각 색소발달단계에 따른 전장 범위가 넓고 다른 색소발달단계와의 전장범위와 많이 중첩되어 일정한 경향을 보이지 않았다(그림 12).

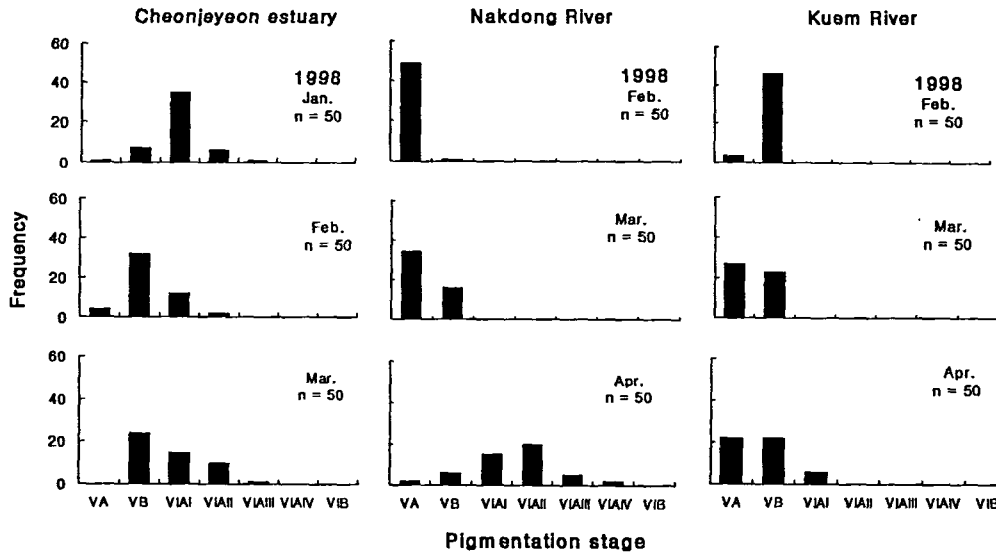


그림 11. 1998년 실뱀장어 주소상시기 동안 천제연, 낙동강 및 금강 하구에서 월별로 채집한 실뱀장어의 색소발달 단계 변화

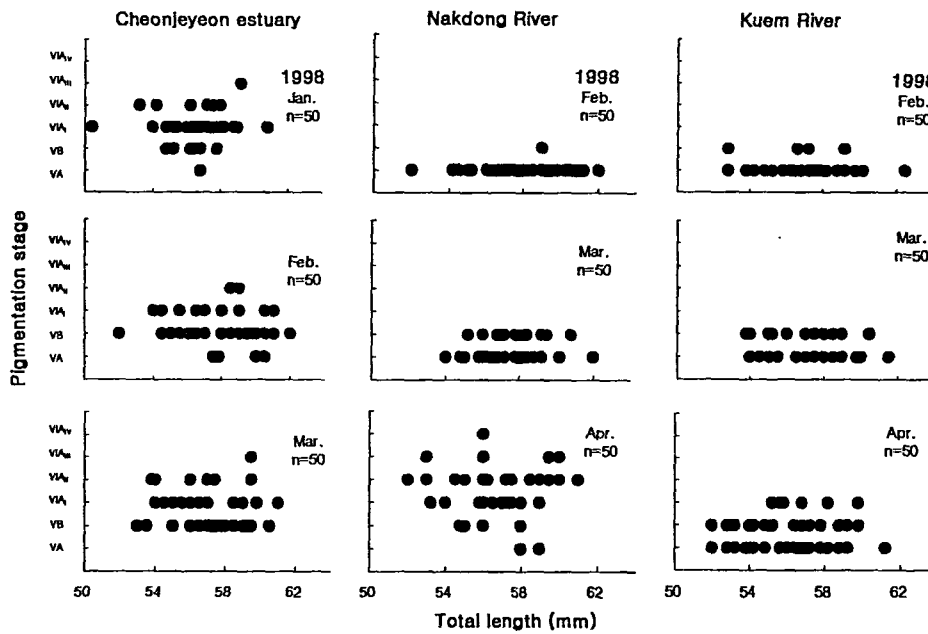


그림 12. 1998년 실뱀장어 주소상시기 동안 천제연, 낙동강 및 금강 하구에서 월별로 채집한 실뱀장어의 체장과 색소발달 단계와의 관계

다. 이석의 미세구조

실뱀장어 이석의 시상면은 전단부와 후단부의 성장이 빠른 타원형 이었으며 핵은 약간 후단부 쪽에 위치하였다. 이석은 광학현미경 암시야 반사광(dark-field epi-illumination) 하에서 핵 주위의 불투명대(opaque zone)와 그를 둘러싼 투명대(translucent zone), 그리고 가장자리의 불투명대로 구분되었다(그림 13). 뱃뱀장어 이석에서 관찰한 것과 같이 핵 주위의 불투명대는 부화 후 난황 흡수기까지 형성되었고, 그 외부로 점점 투명해지

는 부분은 뱀장어 성장기(leptocephalus zone)에 형성된 것으로 알려져 있다(Tabeta et al., 1987). 가장자리 불투명대는 뱀장어가 실뱀장어로 변태하는 동안 형성된 것으로 알려져 있으며(Lee and Byun, 1996), 이석의 가장자리에는 2개 혹은 3개의 성장정지선(growth checks)이 관찰되는 개체들도 있었다(그림 13).

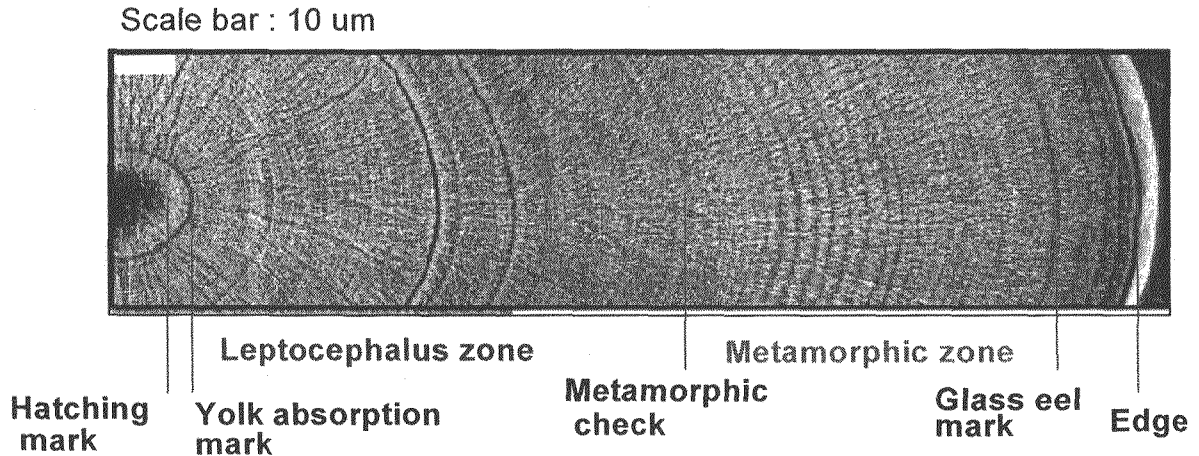


그림 13. SEM으로 관찰한 이석의 미세구조와 각 부위의 생성 시기

SEM으로 관찰한 실뱀장어 이석의 시상면(sagittal plane)에서 핵 주변부는 뱀장어에서와 같았다. 부화정지선(HM) 이후부터 뱀장어기에 형성된 부분에서는 뚜렷한 좁고 비교적 규칙적인 동심원상의 성장선이 관찰되며 부화정지선 이후부터 평균 51.6 ± 5.7 개의 성장선까지 그 성장선 폭이 점점 넓어졌다. 그 후부터 성장선의 폭은 변태점(MC)으로 접근하며 다시 좁아졌으며 상대적으로 전단부와 후단부 쪽으로 성장속도가 조금씩 빨라지는 양상을 보였다. 변태점 이후부터는 성장선 폭이 현저히 넓어졌으며 이석 가장자리 성장정지선(GC)에 가까워지면서 다시 성장선 폭이 좁아졌다(그림 13). 이석의 변태기 후에 형성된 이석 가장자리에는 개체에 따라 2-3개의 성장정지선(GC)이 관찰되며, 이 부분은 성장선이 좁았고 성장선 판독이 어려운 개체도 있었다.

세 지역에서 채집된 실뱀장어 이석의 장반경은 $147.2 \sim 190.4 \mu\text{m}$ 의 범위였으며 평균 $161.6 \pm 8.4 \mu\text{m}$ (mean \pm SD)의 값을 가졌다. 제주도, 낙동강, 금강 실뱀장어 이석의 장반경 평균은 각각 160.7 ± 7.5 , 164.8 ± 8.4 , $159.3 \pm 8.3 \mu\text{m}$ 로 시기와 지역간 이석 장반경간의 차이는 없었다($p > 0.05$). 이석장반경과 전장과의 상관관계는 전체적으로 유의하지 않았으며 지역과 월에 따라 일부가 유의한 회귀관계를 보였다. 이석의 장반경과 일륜수의 관계는 전체적으로 유의하지 않았으며 변태시작 시의 이석반경(Rm)과 일륜수(Nm)는 모두 지역적인 차이가 없었다($p > 0.05$, 표 6).

제주도 실뱀장어의 일륜수는 186 ± 9.0 개, 낙동강과 금강 실뱀장어의 일륜수는 각각 191 ± 10.3 , 189 ± 8.9 개로 지역간의 차이가 없었다($p > 0.05$). 세 지역 모두 일륜수와 전장과의 관계는 유의하지 않았다($p > 0.05$).

표 6. 1998년 실뱀장어 주 소상시기동안 3개 하구역에서 채집된 실뱀장어의 전장(L), 이석의 장반경(R), 변태정지선까지의 장반경(Rm)과 실뱀장어 정지선까지의 장반경(Rg), 그리고 R, Rm 및 Rg까지에서 관찰된 미세성장선수

Month		L	R	Rm	Rg	Nm	Ng	Ng-Nm	N	
		(mm)	Width (um)			No. of Increments				
Jeju	Jan (n=16)	Mean	56.7	156.2	101.8	146.5	129	12	45	186
		SD	1.5	6.0	6.0	6.1	7.6	4.0	4.0	8.6
		Min	53.2	148.8	88.3	137.0	114	5	38	171
	Feb (n=15)	Max	59.0	166.4	110.7	157.4	142	21	53	198
		Mean	59.5	164.5	105.0	153.2	129	15	45	189
		SD	1.6	4.7	5.7	5.1	8.6	4.8	6.0	8.3
	Mar (n=15)	Min	56.5	155.2	96.0	142.9	118	7	37	177
		Max	62.0	171.2	114.7	162.3	148	22	57	201
		Avg	57.5	161.7	104.1	150.5	126	11	45	182
	Total (n=46)	SD	2.0	4.7	5.7	5.3	5.1	1.4	6.1	3.3
		Min	53.5	148.8	88.5	136.9	117	0	37	160
		Max	61.0	182.4	123.4	172.1	136	20	55	195
Nakdong R.	Feb (n=16)	Mean	57.9	160.7	103.6	150.0	128	13	45	186
		SD	2.1	7.5	7.2	7.7	7.4	5.4	5.0	9.0
		Min	53.2	148.8	88.3	136.9	114	0	37	160
	Mar (n=15)	Max	62.0	182.4	123.4	172.1	148	22	57	201
		Mean	58.8	164.5	103.1	152.9	129	15	44	189
		SD	2.3	7.3	6.9	8.0	7.1	4.5	5.7	9.4
	Apr (n=16)	Min	54.2	155.2	92.4	143.1	116	7	36	175
		Max	62.0	182.4	120.6	178.1	143	24	58	209
		Mean	57.4	163.6	102.4	153.1	132	15	46	193
	Total (n=47)	SD	2.2	7.8	6.4	8.8	7.6	3.7	5.0	10.5
		Min	54.8	152.0	92.3	139.7	119	9	39	171
		Max	62.0	177.6	113.8	166.3	144	21	57	207
Kuem R.	Feb (n=16)	Mean	56.4	166.2	101.5	152.4	128	19	45	192
		SD	2.6	10.1	8.6	11.0	7.9	4.4	6.6	11.1
		Min	52.0	147.2	86.9	131.6	110	9	35	170
	Mar (n=15)	Max	61.0	190.4	117.8	172.5	138	28	59	218
		Mean	57.5	164.8	102.3	152.8	130	16	45	191
		SD	2.5	8.4	7.2	9.1	7.6	4.5	5.7	10.3
	Apr (n=15)	Min	52.0	147.2	86.9	131.6	110	7	35	170
		Max	62.0	190.4	120.6	178.1	144	28	59	218
		Mean	57.2	157.7	103.6	149.0	129	13	46	188
	Total (n=46)	SD	1.6	6.0	7.0	4.0	5.6	2.9	2.6	7.0
		Min	54.8	148.8	91.3	140.6	117	7	42	174
		Max	59.8	176.0	118.0	155.7	136	18	53	198
Total	Feb (n=16)	Mean	56.8	157.2	102.3	149.1	128	13	45	186
		SD	1.9	6.9	5.6	9.2	5.6	3.8	3.9	7.2
		Min	54.0	147.2	92.1	136.5	119	7	38	175
	Mar (n=15)	Max	60.5	176.0	111.5	172.3	140	21	52	203
		Mean	56.6	163.0	100.0	152.5	130	19	43	192
		SD	2.4	10.7	8.3	9.7	7.8	4.1	5.7	11.1
	Apr (n=15)	Min	52.0	147.2	83.2	138.3	114	14	36	177
		Max	59.8	179.2	113.5	168.0	139	28	52	211
		Mean	56.8	159.3	102.0	150.2	129	15	45	189
	Total (n=46)	SD	2.0	8.3	7.0	8.0	6.3	4.6	4.3	8.9
		Min	52.0	147.2	83.2	136.5	114	7	36	174
		Max	60.5	179.2	118.0	172.3	140	28	53	211
Total (n=139)	Mean	57.4	161.6	102.6	151.0	129	15	45	188	
	SD	2.2	8.4	7.1	8.3	7.1	5.1	5.0	9.6	
	Min	52.0	147.2	83.2	131.6	110	0	35	160	
	Max	62.0	190.4	123.4	178.1	148	28	59	218	

4. 토의

가. 실뱀장어 전장 및 색소발달단계의 지리적 분포

한반도의 천제연, 낙동강, 금강 하구에서 주 소상시기 3개월 동안 월별로 채집한 실뱀장어의 전장은 50.4~62.5 mm 범위였으며 평균전장은 57.1 ± 2.09 mm로, 각 지역에서 채집 식기 간에 전장의 차이가 나는 경우도 있었지만 전장은 지역간에 차이를 보이지 않았다(표 7). 한반도 하구 실뱀장어의 평균 전장은 거리상으로 산란장으로부터 가까운 대만의 Tung-Kang River, 중국 동남부의 Chyan-Tarnng River, Shuang-Shi River, Ming-Chiang River와 쿠로시오 본류로부터 가까운 일본의 Kagoshima 지역의 평균 전장보다 컸으며, 본류로부터 먼 일본의 Ichinomiya River, Chiba의 평균 전장과 비슷하였다(Tsukamoto, 1990; Cheng and Tzeng, 1996; 문 2002 박사논문 표9 참조). 각 하구의 월에 따른 전장의 분포는 제주도 2월 자료를 제외하고는 시간이 지나면서 평균전장이 감소하는 경향을 보였다. 대만이나 일본 하구의 월별 실뱀장어 전장 변화도 감소 경향을 보였다(Tsukamoto, 1990; Chen and Tzeng, 1996).

Study area	Sampling date	Total length (mm) (Mean±SD)	Source
Tung-Kang R.	Dec. 1992	56.96±1.9	Cheng & Tzeng (1996)
	Mar. 1993	56.07±2.4	
Shuang-Shi R.	Dec. 1992	56.84±2.31	"
	Feb. 1993	55.98±2.15	
Ming-Chiang R.	Mar. 1993	55.07±1.87	"
Chyan-Tarnng R.	Feb. 1993	55.6±1.87	"
Ya-Lu R.	May 1993	58.3±1.8	"
Ichinomiya R.	Jan. 1994	57.41±2.3	"
Kagoshima	Dec. 1982	55.2±1.3	Tsukamoto (1990)
	Jan. 1983	54.7±2.4	
	Mar. 1983	55.3±3.1	
Wakayama	Jan. 1983	58.2±1.3	"
	Feb. 1983	55.8±3.4	
	Mar. 1983	57.3±1.2	
Chiba (Ichinomiya R.)	Dec. 1982	57.7±2.1	"
	Jan. 1983	57.4±2.8	
	Apr. 1983	56.1±3.1	
Tanegashima	Dec. 1996	57.2±1.5	Arai et al.(1997)
Jeju	Jan. 1998	56.7±1.5	This study
	Feb. 1998	59.5±1.6	
	Mar. 1998	56.3±2.1	
Nakdong R.	Feb. 1998	58.8±2.3	"
	Mar. 1998	57.4±2.2	
	Apr. 1998	56.4±2.6	
Kuem R	Feb. 1998	57.2±1.6	"
	Mar. 1998	56.8±1.9	
	Apr. 1998	56.6±2.4	

표 7. 하구와 채집시기에 따른 실뱀장어의 평균 체장

이와 같은 결과는 쿠로시오에서 가까운 강으로 소상하는 실뱀장어의 크기가, 본류에서 먼 강으로 소상하는 실뱀장어 보다 작으며, 특정 하구에는 크기가 큰 뱀장어가 빨리 도달한다는 것을 의미한다. 유럽산 뱀장어는 동북아산 뱀장어에 비하여 분포 범위가 넓으며, 산란장으로부터 먼 강일수록 크기가 큰 실뱀장어가 소상하고, 소상 시기가 늦을수록 평균 전장이 감소한다는 결과와도 비슷하였다(Deelder, 1952).

제주도 실뱀장어의 색소발달단계는 낙동강과 금강의 것보다 분포가 넓었고 후기 단계인 것들이 많았다. 제주도의 경우 실뱀장어 소상시기 수온은 12~16°C로 낙동강과 금강보다 높았다. 또 2월에 최저 수온을 보여 이 시기에 낮은 색소 단계의 개체가 많았다. 낙동강과 금강에서는 채집시기에 따라 수온이 상승하였으며 색소발달단계가 높아지고 분포범위도 넓어지는 경향을 보였다. Bertin (1956)은 수온이 높고 염분이 낮을수록 색소 발달이 빠르다고 보고하였다. 따라서 실뱀장어는 강하구에 도달하여 수온이 상승하며 색소가 발달하는 것으로 판단된다.

나. 산란기 추정의 문제점

뱀장어 이석의 총 일륜수(N)를 실제 나이로 가정하여 추정된 산란시기는 뱀뺨뱀장어 이석으로 추정된 산란기보다 수개월 늦었다. 지금까지 실뱀장어 이석으로 추정된 산란시기는 5월에서 11월로, 실뱀장어의 채집장소, 시기 및 연구자에 따라 큰 차이를 보였다(Tabeta et al., 1987; Tsukamoto, 1990; Umezawa and Tsukamoto, 1990). 뱀뺨뱀장어와 달리 실뱀장어 이석으로 추정된 산란기가 이와 같이 큰 차이를 보이는 것은 크게 관찰 방법과 이석성장 해석에 따른 차이로 생각할 수 있다.

이석관찰 방법에서, 실뱀장어 이석의 미세성장선은 변태이전 부분과 이석 가장자리 폭이 매우 좁아($<0.5 \mu\text{m}$) 광학현미경의 해상력을 벗어나기 때문에 광학현미경으로는 성장선을 구분할 수 없어 전체적인 일륜수가 과소평가되었을 가능성이 있다. 일륜수가 실제 나이보다 과소평가되면 그 일륜수로 추정된 산란기는 실제보다 늦어질 수 밖에 없다.

자료해석에 따른 오차를 알아보기 위해 실뱀장어 일륜수를 실제 나이로 가정하고 산란기를 추정하여(그림. 14) 실뱀장어 이석 일륜수로부터 산란기를 추정할 때의 문제점을 살펴보았다. 우선 광학현미경으로 일륜수를 판독한 자료(Tsukamoto, 1990; Umezawa and Tsukamoto, 1990)는 신뢰도가 낮아 비교에서 제외하였으며, SEM으로 관찰한 자료 중에서도 1990년 중반 이전에 관찰한 자료(Tabeta et al. 1987; Tzeng, 1990; Tzeng and Tsai, 1992)는 난황 흡수 성장정지선부터 일륜수를 계수하여 실제보다 일륜수가 적을(underestimate) 것으로 판단되어, 비교에서 또한 제외하였다. 본 비교에서는 1990년대 중반 이후의 비교적 정확하게 일륜수가 측정된 Chen and Tzeng (1996), Arai et al. (1997)의 자료와 본 연구 자료를 이용하였다.

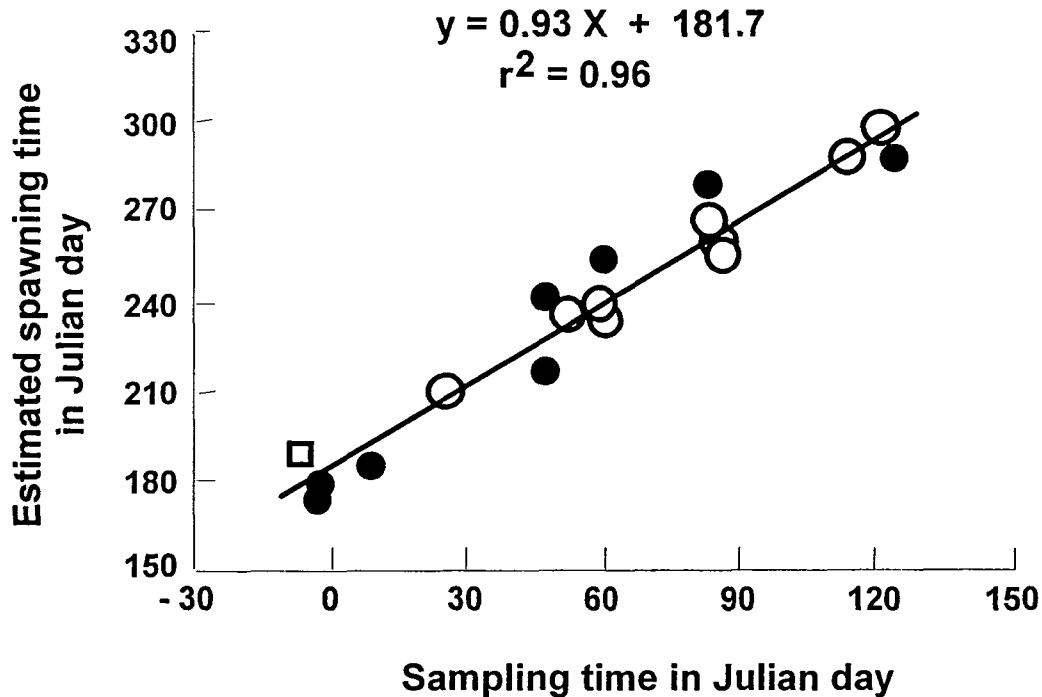


그림 14. 실뱀장어 이석으로 추정된 산란기의 실뱀장어 채집시기와의 관계 (자료 출처, ● Cheng & Tzeng (1996), □ Arai et al. (1997), ○ 본 연구 자료)

채집일과 일륜수로부터 추정된 부화일과의 관계에서 그 기울기가 0.93으로, 채집시기에 따른 부화일이 일정하였다. 만약 실뱀장어 이석의 일륜수가 실뱀장어의 실제 나이를 나타내어 그림. 14의 결과를 받아들인다면, 뱀장어의 산란기는 6월에서 10월 사이이며, 실뱀장어의 나이는 소상하는 강이나 시기에 관계없이 비슷하며, 일찍 부화된 개체가 일찍 소상한다고 볼 수 있다. 이 가정에서 추정된 산란기는 산란장 근해에서 채집된 뱀장어 이석의 일륜수에서 추정된 산란기 4~7월보다 수개월 늦다. 또 쿠로시오 본류로부터 하구까지의 거리에 관계없이 변태이후 실뱀장어가 하구에 도달할 때까지 기간이 비슷한 것은 실뱀장어 일륜수로부터 나이를 추정하는데 문제가 있음을 뜻한다.

지금까지 채집된 변태 중인 뱀장어는 북위 20~22도의 타이완 근해와 쿠로시오 해역에서만 출현하였고(Tabeta and Takai, 1975; Tsukamoto et al., 1992, 1995; Minagawa et al., 2001), 황해 및 동중국해에서는 채집되지 않았다. 그리고 실뱀장어는 12월에서 3월 사이 동중국해 대륙붕에서 채집되어(Tabeta and Takai, 1973; Shojima, 1990), 뱀장어는 동중국해 대륙붕에 도달하기 이전에 실뱀장어로 변태된 것을 알 수 있다. 뱀장어는 실뱀장어로 변태할 때 향문이 앞쪽으로 이동하며, 먹이를 먹지 않는 것으로 알려져 있다(Matsui, 1972). 변태기간 동안 체중과 전장은 줄지만 이석은 계속 자라는데, 이것은 변태하는 동안 몸의 유기물과 탄산칼슘이 재배치된 결과로 보인다(Pfeiler, 1991; Lee and Byun, 1996; Bishop et al., 2000). 뱀장어는 강으로 소상한 후 수온이 15°C 정도에 이르러야 먹이를 섭취하기 시작한다(Matsui, 1972). 이상을 종합하면 이석은 변태기간 동안 몸에

저장된 유기물이 재배치되며 자라지만, 변태를 마치고 동중국해 대륙붕으로 이동한 후부터 먹이를 섭취할 때까지는 이석이 자랄 수 있는 물질이 공급되지 않아 이석의 성장은 멈추는 것으로 추정된다. 만약 변태 후 동중국해 및 연안역을 회유하는 동안 실뱀장어의 이석이 계속 성장하였다면, 쿠로시오 해역에서 먼 강에 소상하는 실뱀장어일수록 변태 이후 형성된 실뱀장어 이석의 외부 불투명대 이후의 폭이 넓어야 하고 일륜수가 많아야 할 것이다. 그러나, 이석 불투명대에 나타난 일륜수는 쿠로시오로부터의 거리에 유의한 차이를 보이지 않았고 본 연구에서도 지리적 차이에 의한 불투명대의 폭과 변태시점부터 하구에 가입하는 시기까지의 일륜수에 유의한 차이가 없었다. 이 결과는 실뱀장어로 변태 이후 동중국해 및 연안역의 찬물을 회유하는 동안 이석의 성장이 정지하였음을 보여준다.

실뱀장어가 변태 후 동중국해의 찬물에 회유하는 기간 동안 이석이 거의 성장하지 않았으면 이석에 나타난 총 일륜수는 실제 나이보다 적을 것이다. 기존연구에서는 실뱀장어 이석의 총 일륜수를 실제 나이로 계산하였기 때문에 뱀장어 이석으로 추정한 산란기보다 수개월 늦어진 것으로 판단된다. 따라서 실뱀장어 이석의 일륜수로부터 뱀장어 산란기를 추정할 수 없으며 쿠로시오 해역으로부터 먼 하구의 실뱀장어일수록 추정한 산란기는 오차가 크게 날 것으로 판단된다.

다. 변태 때의 전장추정

산란장에서 가까운 북적도 해류상에서는 많은 뱀장어 자료가 축적되었고 (Tsukamoto, 1992; Ishikawa et al, 2001), 대만, 중국, 일본, 한국 강하구에서 실뱀장어 자료가 축적되었으나, 변태 단계 뱀장어 자료가 부족하여 변태할 때의 전장을 정확히 추정할 수 없었다. 뱀장어기에 이석의 성장은 일반적으로 전장과 일차 비례하므로 실뱀장어의 이석에 나타난 변태시작점까지의 이석 반경을 뱀장어의 이석장반경과 전장과의 관계식에 대입하여 뱀장어가 변태할 때의 이론적 전장을 추정할 수 있었다.

실뱀장어 이석 미세구조에서, 변태시작점까지의 평균 $102.6 \pm 7.14 \mu\text{m}$ 을, 뱀장어의 이석장반경과 전장과의 관계식 $L=0.48 \times R+2.26$ 에 대입한 결과, 추정된 전장범위는 42.3~61.7 mm 로 평균 51.7 ± 3.44 mm 이었다(그림 15, 표 8). 같은 방법으로 Cheng and Tzeng (1996)의 자료를 이용하여 변태 때의 전장을 추정한 결과, 전장은 49.4~54.4 mm의 분포범위로 평균 52.3 ± 1.65 mm 이었다. 본 연구와 Cheng and Tzeng (1996) 자료로 추정된 변태 때의 전장은 서로 유의한 차이를 보이지 않아 뱀장어의 변태 시기는 비슷하였을 것이라 판단된다. 추정된 변태 때의 전장은 2000년 쿠로시오 해역에서 채집된 변태 마지막 단계의 평균전장 54.5 ± 2.2 mm (Minagawa et al., 2001)에는 유의한 차이를 보이지 않았지만 ($p > 0.05$), 변태 중인 뱀장어 평균체장 56.9 ± 3.10 mm (Tabeta and Takai, 1975; Tsukamoto et al., 1992)에 약 5 mm 정도 작았고, 동중국해에서 채집된 실뱀장어와 본 연구지역인 각 하구에서 채집된 실뱀장어의 전장보다는 각각 5 mm와 6 mm 정도 작았다.

표 8. 뱀장어 말기, 변태기, 실뱀장어의 전장의 관찰값과 추정된 변태기 체장

	TL (mm)		Source
	Range	Mean±SD	
Estimated TL at metamorphosis (Nm) from glass eel otoliths	42.3~61.7	51.7±3.44	This study
Estimated TL at metamorphosis (Nm) from glass eel otoliths	49.4~54.4	52.3±1.65	Cheng & Tzeng (1996)
Observed TL of metamorphic leptocephali	53.1~60.2	56.9±3.10	Tabeta & Takai (1975), Tsukamoto et al. (1992)
Observed TL of late stages of metamorphic leptocephali	51.3~57.0	54.5±2.20	Minagawa et al. (2001)
Observed TL of glass eel collected in the shelf	53.0~61.2	56.5±2.64	Shojima (1990) Tabeta & Takai (1973)
Observed TL of glass eels in Korea estuaries	52.0~62.0	57.4±1.65	This study

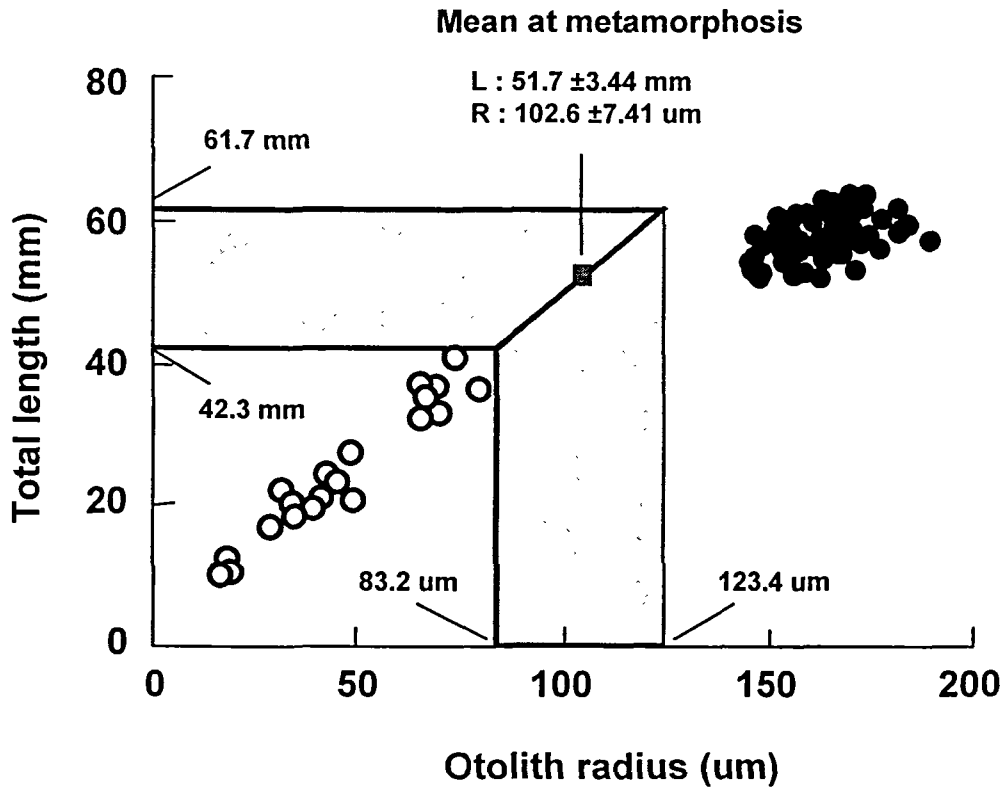


그림 15. 뱀장어 (○) 및 실뱀장어 (●) 이석장반경에 대한 전장의 분포 및 추정된 변태기 때의 전장 및 이석 장반경 분포

뱃잎뱀장어의 이석은 가장자리까지 판독이 가능하며, 이석 반경 및 나이 추정에 거의 오차가 없을 것으로 생각되며 이석반경과 전장과의 관계도 다른 연구 결과와 차이가 거의 없었다. 실뱀장어의 이석 미세구조에 나타난 변태시작점은 성장선 폭이 갑자기 넓어지고 이석의 화학성분 중에 스트론튬과 칼슘 비율(Sr:Ca ratio)이 갑자기 감소하는 부분으로서 많은 다른 연구에서 검증되어(Cheng and Tzeng, 1996; Arai et al., 1997; Otake et al., 1994, 1997), 변태시작점을 정하는 데에는 오차가 없을 것으로 생각된다. 이와 같이 뱃잎뱀장어의 이석과 전장과의 관계와 실뱀장어 이석의 변태시작 기준점에 문제가 없다면, 변태할 때의 추정된 전장이 대양에서 채집된 변태중인 뱃잎뱀장어 전장보다 작은 요인을 다음 2 가지로 추정해 볼 수 있다. 뱃잎뱀장어가 변태할 때 이석이 일부 재흡수 되었을 가능성과 이석이 성장하면서 한 평면으로 자라지 않아 이석 반경을 측정하는데 오차가 생겨 변태 때의 전장이 과소평가(underestimate)되었을 가능성이 있다.

전자의 경우, Cieri and McCleave (2000)는 북미산 뱀장어(*A. rostrata*)가 변태하는 동안 체내의 물질대사 과정 중에 이석에 형성된 칼슘 성분이 골격구조 형성으로 일부 전환될 수 있다는 가능성을 제기하였다. 변태하는 동안 이석의 가장자리가 재흡수(reabsorption)되기 때문에 실뱀장어의 이석 미세구조에 나타난 변태시작점의 반경은 뱃잎뱀장어 시기의 이석 성장 패턴과 다르게 나타날 수 있다. 변태 과정에서 뱃잎뱀장어기에 형성된 이석의 일부가 재흡수 되었다면 본 연구에서 뱃잎뱀장어의 장반경과 전장으로 부터 추정된 변태 때의 전장은 다소 적게 평가되었을 가능성이 있다. 그러나 변태할 때 이석 가장자리가 재흡수 되었다면 실뱀장어 이석에서 변태하는 부분에 성장정지선이 관찰되어야 하는데 본 연구에서는 그와 같은 불연속면을 관찰할 수 없었고 변태기 동안의 성장선 폭이 다른 시기에 비해 상대적으로 넓어 변태시기의 이석가장자리 재흡수 가능성은 타당성이 적은 것으로 판단된다.

후자의 경우, 뱀장어 이석은 부화 이후 초기에는 동심원상으로 자라다가 전단부와 후단부의 성장이 약간 빨라지지만 뱃잎뱀장어 이석에서는 시상면(sagittal plane)을 찾기 쉽다. 그러나, 변태가 시작되며 이석은 한 평면상으로 자라지 않고 성장 방향과 각도가 약간씩 변하게 된다(Lee and Byun, 1996). 실뱀장어 이석의 시상면을 따라 이석반경을 측정하여도 이석의 실제 성장면이 반영되지 않아 이석반경이 작게 측정될 수 있다. 이러한 이유로 실뱀장어 이석에서 변태 때의 반경으로 추정된 전장은 대양에서 채집된 변태 중인 뱃잎뱀장어보다 약간 작게 추정되었을 것으로 판단된다.

라. 초기생활사 해석(변태~실뱀장어기 회유 및 성장)

본 연구에서 실뱀장어 이석의 미세구조를 관찰한 결과, 뱀장어는 부화하여 평균 129일이 경과하면 변태하기 시작하며 이때 계산된 전장은 수 mm 정도 과소평가 되는 것으로 추정된다.

뱃잎뱀장어는 변태하는 동안 외부로부터 먹이를 섭취할 수 없으며 체내의 젤라틴 성분인 glycosamoglycan (GAG)의 분해 작용만 있기 때문에 전장이 약간 감소할 것으로 생각

된다. 지금까지 대양에서 채집된 변태 마지막 단계의 뱃잎뱀장어 전장이 변태 중인 뱃잎뱀장어 전장보다 약 2.4 mm 작았으며 뱀장어와 같은 *leptocephalus* 기를 거치는 붕장어도 변태하는 동안 전장이 감소하였다(Lee and Byun, 1996).

동중국해 대륙붕 해역에서 채집된 실뱀장어는 변태 마지막 단계의 전장보다 평균 2 mm 정도 컸으며 본 연구 지역인 각 하구에서 채집된 실뱀장어의 전장은 동중국해에서 채집된 초기 단계의 실뱀장어보다 평균 1 mm 정도 커 변태를 마친 실뱀장어는 일정기간 동안 전장이 성장하였을 것으로 추정된다. 하구에서 채집된 초기 단계의 실뱀장어는 아직 위 소화선(gastric gland)이 발달하지 않아 위에서 먹이를 소화할 수 없지만 입으로 유입된 유기입자가 장(gut)의 상피조직에서 흡수되어 뱃잎뱀장어와 같이 장에서 유기물 흡수 기능을 가지고 있는 것으로 알려져 있다(Nakamura *et al.*, 2001). 따라서, 변태 이후 수온이 높은 해역에 머물렀던 실뱀장어들은 약간 성장하였을 것으로 판단된다. 실뱀장어 이석 가장자리 성장 정지선 이후 자란 부분이 이 때 성장한 것으로 추정되며, 실뱀장어에 따라 차이가 있는 것은 수온이 높은 해역에 머물렀던 기간의 차이로 추정된다.

본 연구에서는 이석에 나타나는 변태 이후 형성된 이석의 미세성장선과 동중국해의 해황과 연관하여 좀 더 구체적으로 실뱀장어의 회유 및 성장을 살펴보았다. 동중국해에서는 쿠로시오 북단에 쿠로시오 전선(Kuroshio front)이 형성되고, 그 보다 약간 북쪽에 연안수 전선(coastal water front)이 형성된다(Lie and Cho, 2001). 수온이 가장 낮은 2월의 경우 쿠로시오 전선의 표층 수온은 약 20 °C, 연안수전선은 약 15 °C 였다. 뱃잎뱀장어나 초기 단계의 실뱀장어는 수심 50~100 m 층에서 채집되기 때문에 이들이 잡힌 층의 수온은 표층수온보다 낮을 것으로 예상된다. 제주도의 실뱀장어 주 소상 시기는 2월로 연중 수온이 가장 낮은 때이다. 또, 연중 수온이 높은 대만이나 일본 남부의 주 소상 시기도 연중 수온이 가장 낮은 때였다. 이것은 실뱀장어가 낮은 수온을 따라 동중국해 및 연안수역을 회유하였을 가능성을 제시하고 있다. 제주도에서 잡힌 실뱀장어에서 색소가 발달하지 않은 초기단계 실뱀장어의 수온 변화에 따른 산소소모량 변화를 보면 수온 13.5 °C까지는 산소소모량이 일정하게 낮았고, 13.5°C 이상에서는 수온이 높아짐에 따라 산소소모량이 증가하였다. 색소가 발달된 후기 실뱀장어는 수온 25°C까지 산소소모량이 계속 증가하여, 초기 단계의 실뱀장어와 다른 양상을 보였다(Lee and Kim, 2002).

위 결과는 뱀장어가 색소포를 갖추고 어느 정도 자란 성장기에는 고 수온에 적응한 데 비하여 색소포가 완전히 발달하지 않은 실뱀장어는 13.5°C 이하에 머무는 것이 에너지 소비를 최소화할 수 있음을 의미한다. 뱃잎뱀장어는 실뱀장어로 변태하여 동중국해 해역으로 이동한 이후부터 하구에 도달할 때까지 먹이를 소화할 수 없기 때문에 이 기간 동안에는 에너지 소모를 최소화하여야 하구에 도달할 수 있을 것이다. 따라서, 실뱀장어는 동중국해 및 연안수역에서 낮은 수온을 따라 하구로 회유하는 것으로 추정된다.

실뱀장어 이석에서, 변태기 때 생성된 부분의 바깥쪽 가장자리에 성장 정지선이 나타나고 그 외부에 폭이 좁은 미세 성장선이 관찰된다. 이것은 실뱀장어가 변태를 마친 후부터

동중국해로 회유해 오면서 13.5°C 이상의 수온에 머물렀던 시간을 나타내는 것으로 추정된다. 본 연구 지역인 한국 하구에서 채집된 실뱀장어 전체 평균전장은 57.1±2.07 mm 였으며, 쿠로시오 상에서 채집된 변태 초기 뱀장어는 56.9±3.10 mm, 변태 말기에는 54.5±2.20 mm, 그리고 동중국해에서 채집된 실뱀장어는 56.5±2.64 mm로 차이가 있었다(표 8). 채집된 개체수들이 적었고, 각 성장기 개체에 따른 차이가 커서 통계적으로 그 차이가 유의하지는 않았지만, 실험실 관찰이 가능하였던 뱀장어의 변태와 비교하면 다음과 같이 추론할 수 있다. 변태 초기보다 말기 뱀장어가 2.4 mm 적은 것은 변태 중 뱀장어 전장이 감소하는 것으로 보인다. 또, 변태 말기보다 동중국해 해역을 회유하는 실뱀장어가 2 mm 크고, 본 연구의 실뱀장어는 변태말기보다 2.9 mm 커서, 변태 이후 실뱀장어가 약간 자란 것으로 보인다. 본 연구 실뱀장어 이석 가장자리 성장정지선 이후 미세성장선의 수는 0~28개의 범위였고, 평균은 15±5.1 개였다. 실뱀장어는 변태를 마친 후 수온이 높은 곳에서는 장으로 흡수된 유기물을 이용하여 자랄 수 있으므로 실뱀장어가 변태를 마친 후 평균 15일 정도 자란 것으로 추정된다. 실뱀장어로 변태 후 자랄 수 있는 수온은 정확히 알 수 없지만 Lee and Kim (2002)의 결과로 미루어 13.5°C 정도로 추정된다. 실뱀장어가 일단 수온 13.5°C 이하의 물속으로 들어와 회유하면 소화기능 정지로 유기물 공급이 되지 않기 때문에 실뱀장어는 성장을 멈추고, 이석도 성장을 멈추었을 것으로 추정된다.

위의 내용을 종합하면, 실뱀장어 이석의 미세구조를 분석하면 뱀장어 기간, 변태기간 및 변태 후 13.5°C 이상의 수온에 머물러 성장한 기간은 추정할 수 있지만, 변태 때의 전장은 약간 과소평가되고 실뱀장어의 나이는 추정할 수 없을 것으로 판단된다(그림 16).

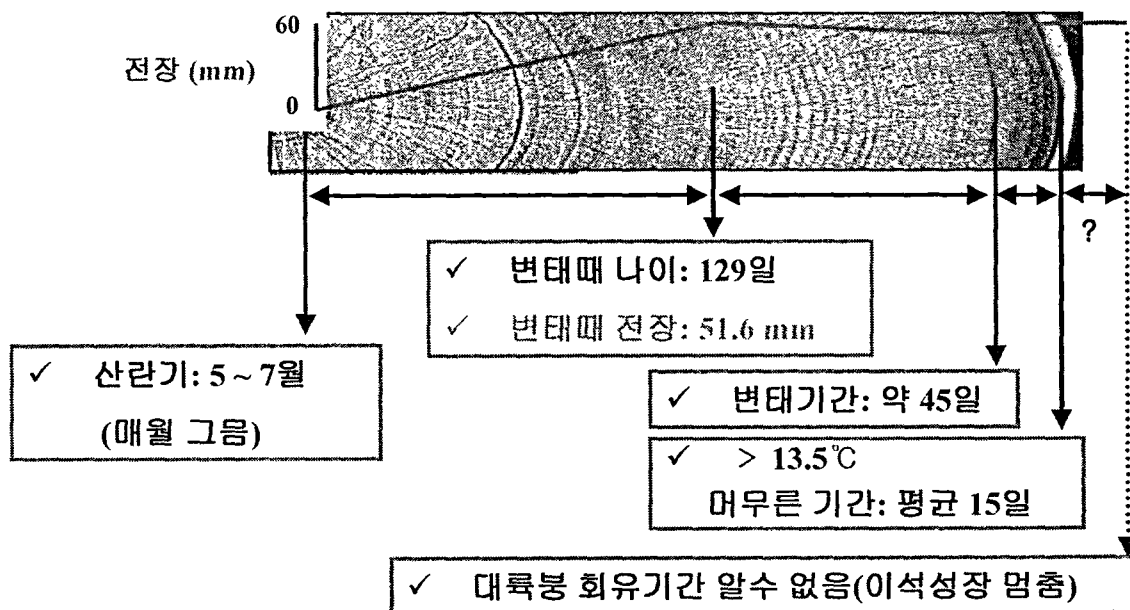


그림 16. 실뱀장어 이석으로부터 뱀장어 초기 성장 추정 모식도

제 3 장 실뱀장어의 소상 생태

제 1 절 금강 하구 실뱀장어 소상생태

1. 서론

금강 하구는 폭 2 km, 수심 10 m 이하, 대조기 때 조차 7.5 m인 서해안의 전형적인 하구로 1994년 8월 31일자로 하구둑 수문을 작동하였으며, 수문은 썰물 때 약 2시간 정도 열어 댐의 수위를 조절한다(Lee *et al.*, 1999). 금강 하구에서 하구둑 건설 이후 정상적인 조류 이동이 방해받아 실뱀장어 채포량이 감소하였다. 따라서 실뱀장어 채포 허가 건수는 300여 척이지만 현재 70여 척이 2-5월 사이에 강한 조류를 이용하여 조업을 하고 있다.

뱀장어 *Anguilla japonica*는 생태적인 관점에서 산란장(Tsukamoto, 1992), 회유(Tsukamoto, 1990; Tsukamoto and Umezawa, 1990; Kimura *et al.* 1994; Kimura *et al.* 1999; Kimura *et al.* 2001), 그리고 생물학적 연구(Cheng & Tzeng, 1996 and therein)가 많이 수행되었다. 또한, 실뱀장어 이식에 나타나는 성장선을 이용한 초기생활사를 밝히려는 여러 노력이 있었다(Tabeta *et al.*, 1987; Lee and Lee, 1989; Umezawa *et al.*, 1989; Tsukamoto, 1989; Tsukamoto *et al.*, 1989; Tzeng, 1990; Cheng and Tzeng, 1996; Lecomte-Finiger *et al.* 1996; Tsukamoto *et al.*, 1998; Moon, 2002). 뱀장어(leptocephali)는 북적도 해류와 쿠로시오 해류를 따라 회유하는데, 오키나와 남쪽과 대만 부근 해역에서 실뱀장어(glass eels)로 변태를 하여 대륙붕을 지나 하구로 들어온다. 실뱀장어는 대만에서 12월에서 이듬해 2월에 주로 출현하며, 한국 서해의 강 하구에는 주로 3월에서 5월 사이에 도달한다. 그러나 실뱀장어가 하구로 회유하는데 영향을 주는 정확한 요인에 관해서는 아직 밝혀지지 않은 실정이다(Pease, 2001).

본 연구에서는 실뱀장어의 소상 원인을 밝히기 위하여 조석주기, 수온, 염분 및 기상과 관련하여 실뱀장어의 일일 채포량을 분석하였다.

2. 재료 및 방법

금강 하구에서 실뱀장어 어획시기인 2월 하순부터 5월 초순까지 2001년부터 2003년 사이의 3개년 동안 소상하는 실뱀장어를 개량안강망 5척(척당 2-3개 그물)을 이용하여 매일 주야로 어획하였다(그림 17). 실뱀장어 개량안강망은 망구 면적 10x6 m², 망 길이 40 m, 그물코 크기 <5 mm이며, 주로 사리 밀물 때(대조기 창조시) 2-3시간 정도 동안 강한 조류를 이용하여 어획하였다. 어획된 실뱀장어는 매일 주야로 그물당 어획 마리수로 환산하였다.

조사기간 동안 해양환경요인을 병행 조사하였다. 수온과 염분은 국립수산과학원 서해수산연구소 군산분소의 오전 10시 정지관측자료를, 풍속과 운량 등의 기상자료는 군산 기상레이다 관측소의 오전 10시 자료를 이용하였다. 담수방류량은 농업기반공사 금강 사업단의 자료를 이용하였고, 조석에 따른 조위는 해양조사원의 장항 검조소 자료를 이용하였다.

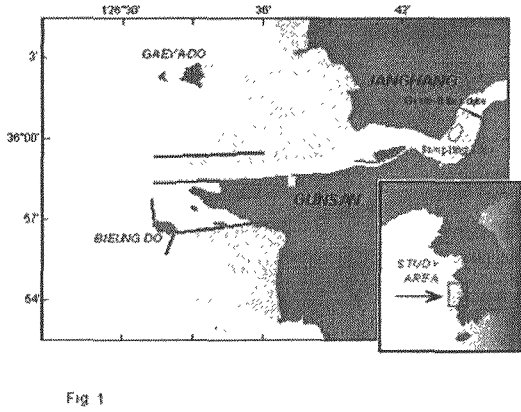


그림 17. 금강 하구의 실뱀장어 채집 정점과 실뱀장어 잡이 개량 안강망

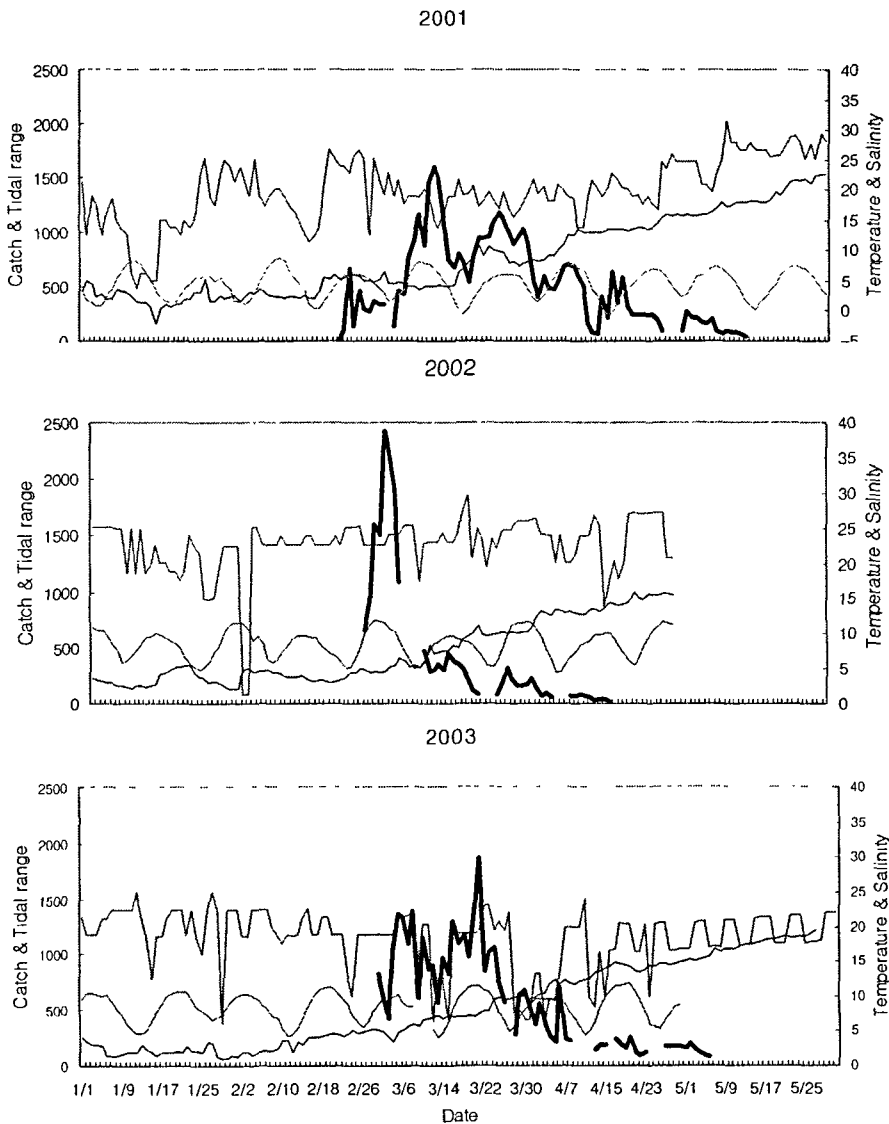


그림 18. 금강 하구에서 2001년에서 2003년 사이 실뱀장어 소상 기간 동안 개량 안강망에 어획당 일일 평균 어획 개체수, 조사 기간 동안의 수온(파란선), 염분(붉은선) 및 조차 변화(초록선)

3. 결과 및 토의

가. 실뱀장어 어획량 변동과 소상 환경

실뱀장어는 약 5℃ 내외의 2월 20일 경에 어획되기 시작하였다(그림 18). 어획량은 2월 말대조기에 높았고, 3월 초의 소조기에는 낮았으며, 3월 중순의 대조기에 그물당 1,580마리로 가장 많이 어획되었는데 그때의 수온은 10℃내외이었다. 다. 이후 18℃ 이상으로 수온이 상승하는 5월 중순 이후에는 거의 어획되지 않았다.

어기가 시작되는 2월의 평균수온이 2001년에는 2.9℃, 2002년 4.0℃, 2003년 3.5℃으로 2001년이 수온이 가장 낮았고, 2002년이 가장 높았다. 수온은 2월 말 이후 증가하여 4월말에서 5월 초 수온이 15℃ 이상으로 높아지면 거의 잡히지 않았다. 겨울철 수온이 높은 2002년에는 어획 초기에 상대적으로 많은 양이 어획되었고, 4월 중순 이후에는 거의 잡히지 않았다(그림 18). 조사기간 동안 금강 하구에서 조위는 244-763 cm 범위로 그믐과 보름의 사리때 조차가 컸다

나. 소상 요인

실뱀장어 소상에 영향을 주는 요인을 분석하기 위하여 주야간 어획량 변동 양상에 큰 차이가 없어 일일 그물당 평균 어획량을 계산하여, 수온, 염분, 조차, 풍속과의 관계를 Generalized liner model (GLM)을 이용하여 연도별로 분석하였다(표 9). SAS의 GLM proram을 이용하여 분석한 결과 2001년에는 풍속 이외에는, 2003년에는 조차 이외의 환경 요인은 유의한 상관관계를 보였다(χ^2 test, $p < 0.01$). 그러나, 2002년에는 조차를 제외한 나머지 환경 요인들은 유의한 상관관계를 보이지 않아, 해에 따라 소상하는 실뱀장어에 미치는 영향이 다름을 알 수 있다.

표 9. Generalized linear model (GLM)을 이용한 소상에 미치는 요인 분석

2001년

Parameter	DF	Estimate	Square	P
Intercept	1	6.6094	89.14	<0.0001
Temperature	1	0.2345	8.08	0.0045
Temperature ²	1	-0.0169	14.61	0.0001
Salinity	1	-0.0799	17.13	<0.0001
Tidal range	1	0.0013	6.61	0.0101
Wind speed	1	0.0082	0.15	0.6960

2002년

Parameter	DF	Estimate	Square	P
Intercept	1	5.2194	12.32	0.0004
Temperature	1	-0.2705	1.24	0.2650
Temperature ²	1	-0.0066	0.20	0.6532
Salinity	1	0.0776	1.76	0.1852
Tidal range	1	0.0026	11.81	0.0006
Wind speed	1	-0.0053	0.03	0.8533

2003년

Parameter	DF	Estimate	Square	P
Intercept	1	5.0226	115.22	<0.0001
Temperature	1	0.3683	16.73	<0.0001
Temperature ²	1	-0.0294	35.26	<0.0001
Salinity	1	0.0294	8.79	0.0030
Tidal range	1	0.0007	3.40	0.0654
Wind speed	1	-0.0468	6.11	0.0134

(1) 밤낮과 조석에 따른 변동

실뱀장어 어획량은 낮에 비하여 밤에 유의하게 많은 양이 채집되었다. 뱀장어가 야행성인 것은 잘 알려져 있으며 실뱀장어도 주로 야간에 활발함을 알 수 있다(그림 19). 밤낮에 관계없이 실뱀장어 어획량은 주기적인 변화를 보였는데 조차가 큰 사리 때에 어획량이 높음을 알 수 있다. 하구역에서 실뱀장어는 밀물을 이용하여 강 쪽으로 이동하는 것으로 알려져 있어 본 결과는 이를 뒷받침한다.

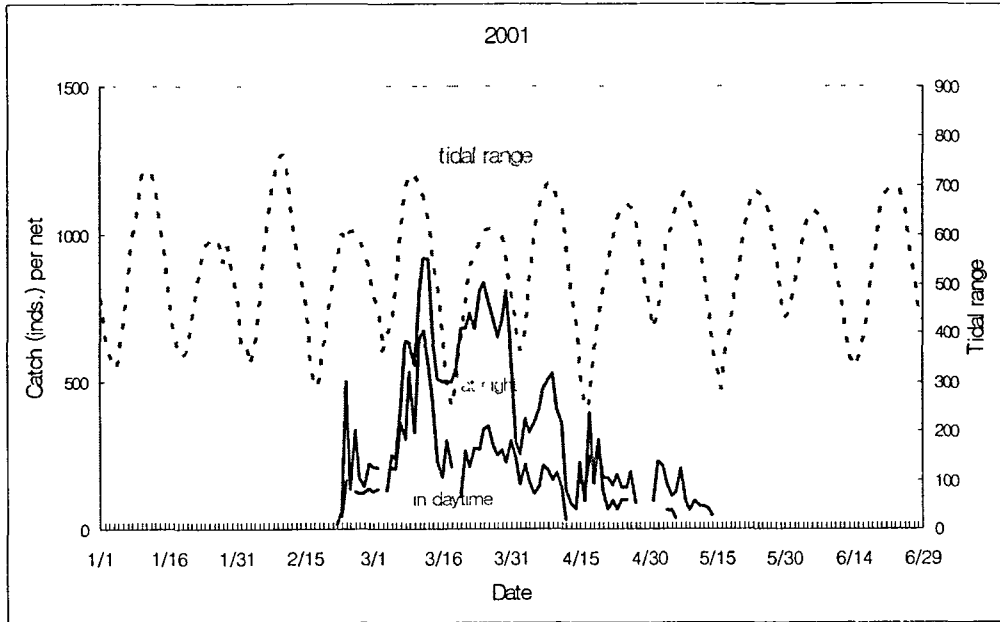


그림 19. 밤낮과 조석에 따른 실뱀장어 어획량의 일변동

(2) 수온에 따른 변동

실뱀장어가 조류를 따라 수동으로 이동하기 때문에, 다른 요인을 분석할 때는 조석 요인을 배제시킬 필요가 있다. 그물을 통과하는 물의 양은 조차와 일차비례하기 때문에 조석의 영향을 배제하기 위해서 밤에 잡힌 실뱀장어의 양을 조차로 나누어 도시하였다(그림 20). 이 그림에서 그물을 통과한 물의 체적당 실뱀장어의 어획량은 수온이 8-10도에서 최대값을 보여 이 수온 범위가 금강하구에서 실뱀장어 소상 최적 수온임을 알 수 있다.

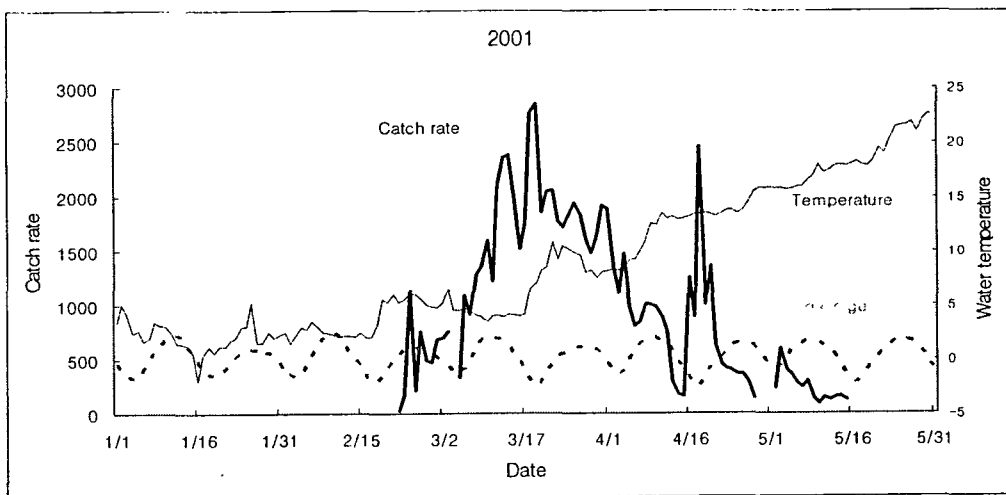


그림 20. 조석 영향을 배제한 그물을 통과한 단위물의 체적당 잡힌 실뱀장어 어획량

(3) 조석과 수온을 제외한 요인

수온은 실뱀장어의 소상 시기를 결정하고, 조차는 단주기 어획량을 좌우하기 때문에 다른 요인을 분석하기 위해서는 이 요인들을 배제하여야 한다. 조석 영향을 배제한 단위 물부피당 어획량 자료를 14 d 이동 평균값을 구하여 편차를 구하여 자료를 정리하였다(그림 21). 이 편차는 하구의 담수 방출량이나 구름량과는 어떤 상관관계도 보이지 않았고 염분과 풍속과는 약간의 상관관계를 보였다. 그림 21에서와 같이 염분이 낮아지거나 바람이 강하게 분 후 2-3일 후에 상대 채포량이 높아지는 것을 볼 수 있어 낮은 염분과 강한 바람은 실뱀장어 이동에 영향을 주는 것을 알 수 있었다.

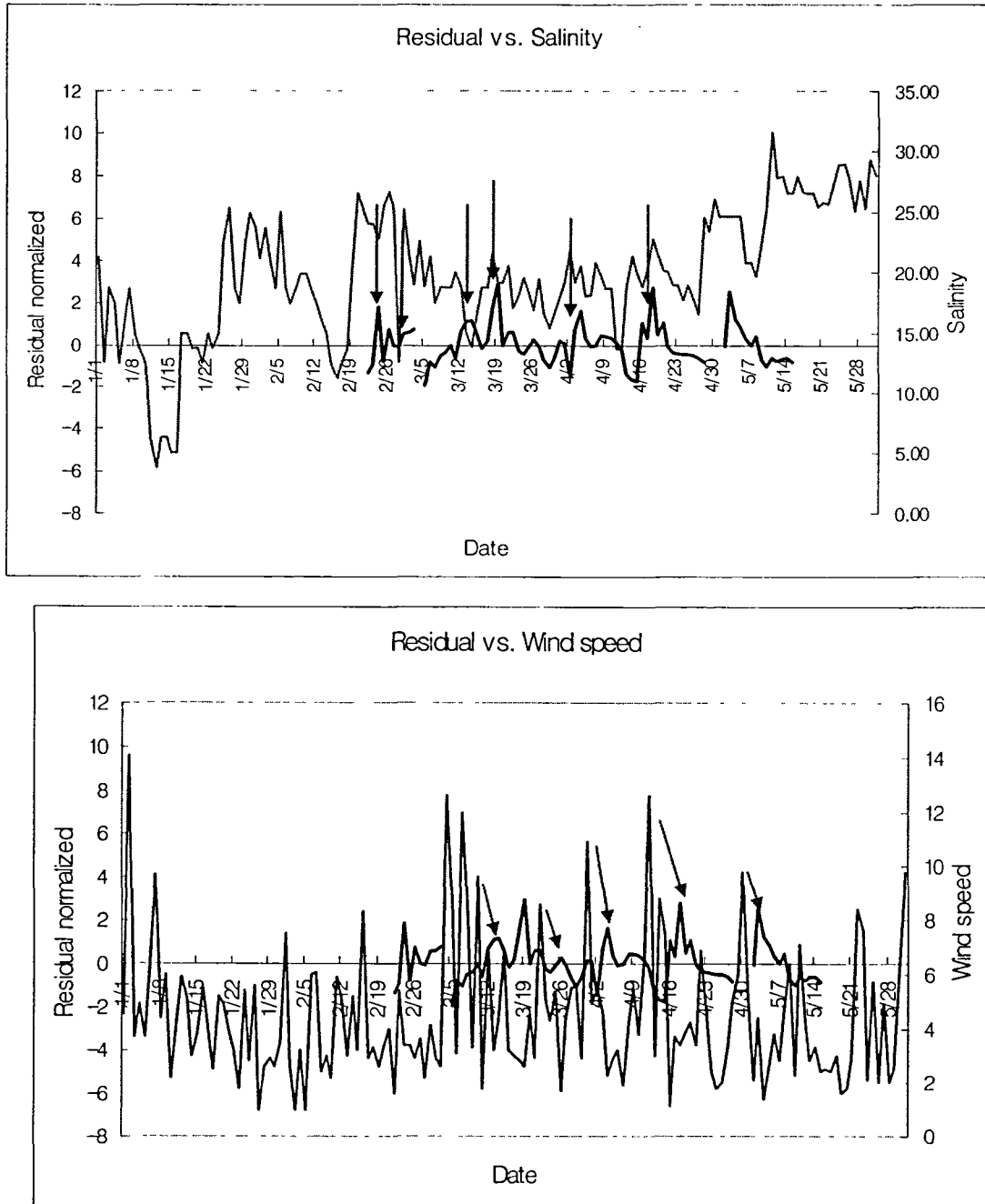


그림 21. 조석과 수온의 영향을 배제한 실뱀장어 채포량 편차와 염분 및 풍속과의 관계

제 2 절 수온 변동에 따른 실뱀장어의 생리적 반응

1. 서론

동북아산 뱀장어 *Anguilla japonica*는 알에서 부화한 후 뱃뱀장어 시기를 거쳐 대륙붕 부근에서 실뱀장어 단계로 변태를 하고 해류나 조류에 의한 수동적 운송을 통해 하구나 tidal 지역으로 가입된다(Tsakamoto, 1992). 이 시기부터 실뱀장어는 수온, 염분 및 조석 등을 포함한 새로운 환경의 변화에 대한 다양한 생리적 적응과정을 거치게 된다.

이에 본 연구에서는 수온 변동에 따른 실뱀장어의 생리 반응을 관찰하기 위하여, 자동호흡 측정기를 이용하여 수온 변동에 따른 실뱀장어의 산소소비 형태를 조사하였다.

2. 재료 및 방법

본 연구에서는 2000년 3월, 2001년 5월 및 2002년 1월에 한국의 서부연안에 위치한 강화도 및 군산 내항의 금강 하구에서 채집된 시료를 대상으로 실험을 수행하였다.

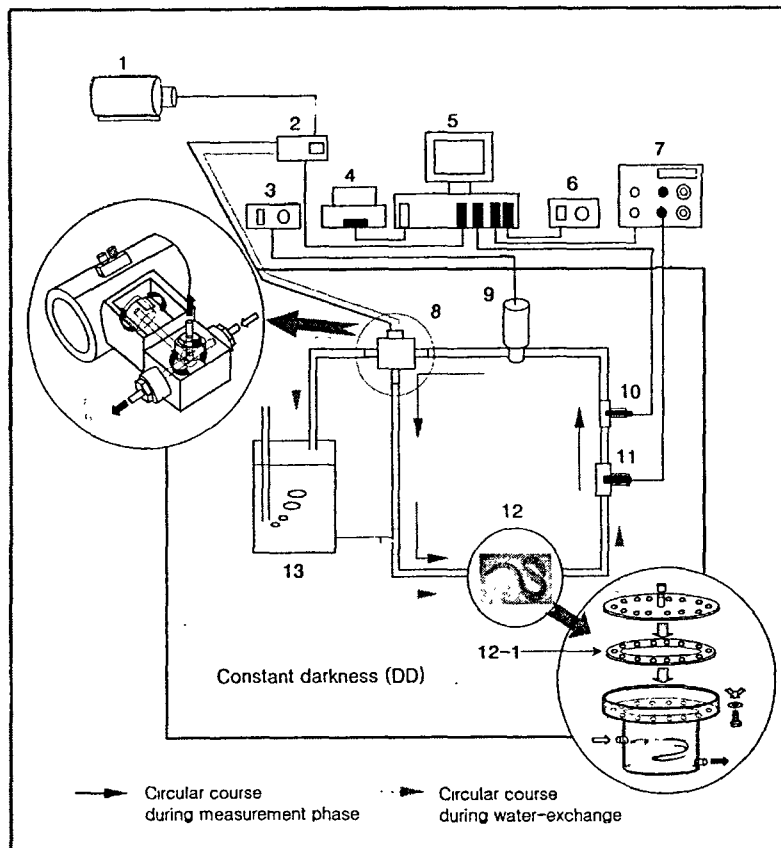


그림 22. 자동호흡장치 개요.

1. 콤프레투 2. 밸브 조절 박스 3. 유량 펌프 조절장치 4. 프린터 5. 자료 저장 및 측정시스템의 통제에 이용되는 컴퓨터 6. 대기압 센서 7. 피코 암페어 메타 8. 3 방향 밸브 9. 마그네틱 기어 펌프 10. 온도 센서 11. 산소센서 12. 측정 용기 (12-1). 실리콘 링 13. 실험용수 공급 용기

또한 실뱀장어는 외양에서 연안지역으로 유입되는 조류의 세기가 강하고 조도가 약한 야간에 활동성이 강한 생태적 특성 때문에 이들의 채집 시기는 각 월의 그믐 때로 정하여 주기적으로 채집하였다. 채집된 시료는 채집 장소에서 직접 채수한 물을 이용하여 실험 전까지 보존하였으며 수온 역시 채집 시 측정된 값을 유지시켰다. 실뱀장어의 생리적 반응 실험은 측정 시스템을 완전 자동화 시킨 자동호흡측정기를 사용하여 실시하였으며(그림 22), 실뱀장어의 호흡에 영향을 줄 수 있는 외부의 자극 요인(외부의 진동, 수온 및 조석 등)을 배제시킨 채 온도 조절이 자유로운 BOD incubator 내에서 수행하였다. 또한 실험기간 중에는 항상 어두운 상태를 유지시켰으며 먹이 공급에 따른 실뱀장어의 대사활동을 배제시키기 위해 시료의 유지 및 실험 기간 동안 먹이를 공급하지 않았다.

수온 변동에 따른 실뱀장어의 산소소비 반응 실험은 다음과 같은 방법으로 실시하였다. 첫째, 채집 장소와 유사한 수온에서 일정시간(약 3일) 안정된 상태에서 실뱀장어의 산소소비율을 측정 후 12시간 마다 1°C씩 수온을 상승시키면서 생물의 산소소비 반응을 관찰하였다. 둘째, 실뱀장어의 산소소비 활동은 고유의 대사 패턴(채집 지역의 조석과 관련된 12.4 시간의 주기)이 나타날 수 있다. 따라서 이러한 주기를 배제시킨 채 임의로 7시간 마다 1°C 또는 2°C 가량 주기적으로 수온을 상승·하강시켰을 때 나타나는 실뱀장어의 산소소비 반응을 관찰하였다.

3. 결 과

수온변화에 따른 실뱀장어의 산소소비 반응을 관찰하기 위하여 5개체를 용기에 넣고 12시간 마다 1°C씩 수온을 상승시키며 약 16일 동안 관찰하였다. 측정된 자료를 가중이동곡선으로 처리하여 도식화 한 결과(그림 23A), 실뱀장어의 산소소비율은 수온이 12.9°C에 도달할 때까지 0.10 ± 0.06 (평균 \pm 표준편차) $\text{ml O}_2 \text{ g}^{-1} \text{ WW h}^{-1}$ 로 비교적 낮은 수준을 유지하였다. 그러나 수온이 계속 상승함에 따라 산소소비율은 계속 증가하여 21.5°C에서는 최대 정점($0.28 \text{ ml O}_2 \text{ g}^{-1} \text{ WW h}^{-1}$)에 도달하였으며, 21.5°C 이상의 수온에서는 다시 감소하였다. 또한 동일한 조건 하에서 반복실험 결과, 실뱀장어의 산소소비율은 13.2°C에서 증가하기 시작하여 20.7°C에서 최대 값이 측정된 후 다시 감소하는 경향을 보였다(그림 23B).

수온이 주기적으로 상승·하강할 때 수온변동에 따른 실뱀장어의 산소소비 반응을 관찰하였다. 실험 결과, 생물의 산소소비는 수온의 변동에 주기와 유사한 패턴으로 진행되고 있었으며, 가중이동평균곡선으로 분석한 자료에서도 산소소비의 최대 정점 사이에 나타난 시간 주기는 일주기의 형태를 띠고 있었다(그림 24).

한편 일주거나 조석주기와 같이 실제 자연에서 나타나는 주기성과는 다르게 임의로 7시간 마다 1°C 또는 2°C의 수온을 주기적으로 상승 또는 하강시켰을 때 나타나는 실뱀장어의 산소소비 반응을 관찰한 결과, 생물의 호흡률에 대한 정점은 1°C나 2°C의 변동 폭과 전혀 상관없이 두 경우 모두 수온 변동주기(14시간)와 유사하게 나타났다(그림 25).

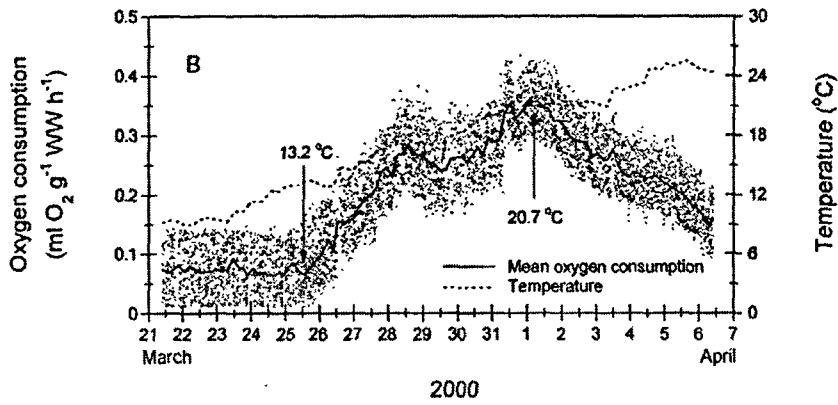
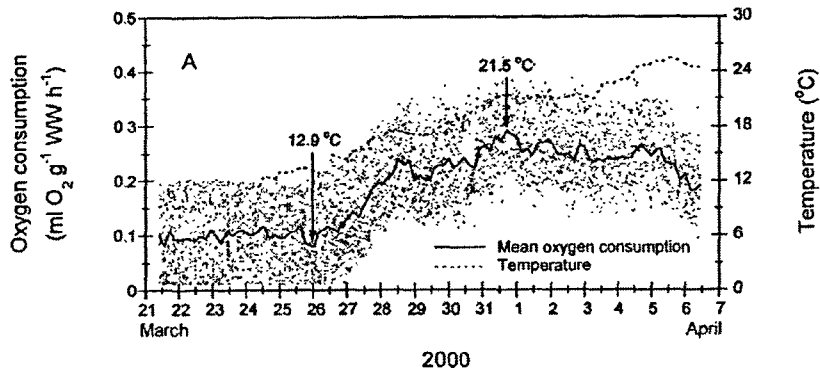


그림 23 (A) 31.2 psu의 염분 농도에서 8°C에서 26°C까지 12시간마다 1°C씩 수온을 상승시키며 관찰한 실뱀장어의 산소소비율 변화. (B) 동일한 조건에서 반복 실험한 실뱀장어의 산소소비 반응 결과.

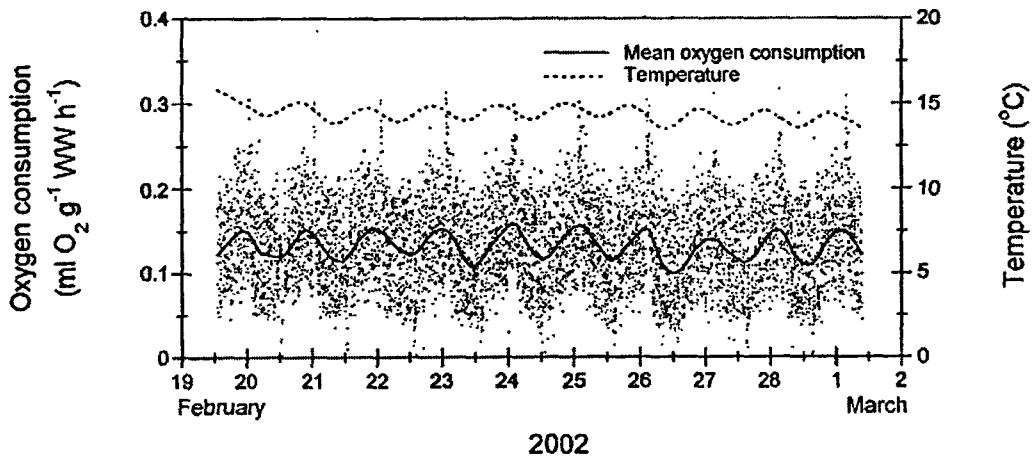


그림 24. 10일 가량 12시간마다 1°C씩 수온을 상승·하강시키며 관찰한 실뱀장어의 산소소비 반응

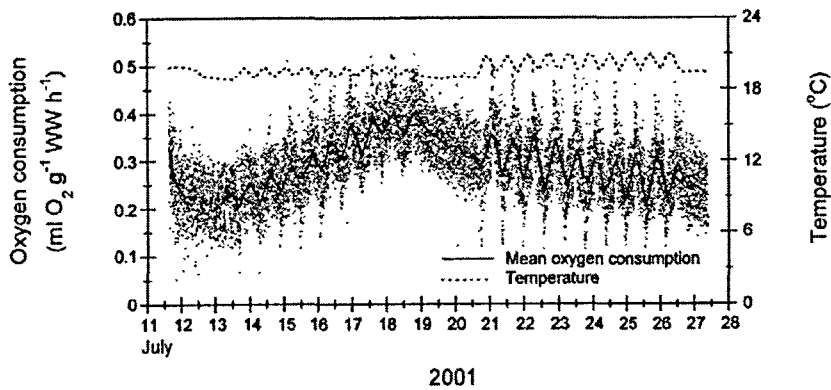


그림 25. 조석주기(12.4 시간)를 배재시키고 7시간 마다 1°C 또는 2°C씩 수온을 상승·하강시키며 관찰한 실뱀장어의 산소소비 반응.

4. 결론

본 연구에서 일정 시기마다 수온을 상승시키면서 실뱀장어의 산소소비 반응을 관찰한 결과, 13°C 이하의 수온에서 실뱀장어의 산소소비 활동은 비교적 낮고 일정한 상태를 유지하였다. 이러한 현상은 실뱀장어의 채집 자료나 이들의 행동에 대한 연구에서도 잘 설명해 준다. Lee and Kim (2001)은 한국 연안의 수온이 5~16°C의 범위일 때 실뱀장어가 주로 출현하고 10~13°C 범위에서 가장 많은 개체가 채포된다는 결과를 보고하였으며, Desauvay and Guerauld (1997)는 실뱀장어의 행동을 연구하는 과정에서 이들은 수온이 낮은 시기에 거의 활동을 멈춘 상태로 저층에 머무른다는 것을 관찰하였다. 이러한 연구 자료는 본 연구 결과와 매우 연관성이 있을 것으로 생각된다. 결과적으로 본 연구 결과에서도 잘 나타났듯이 실뱀장어는 수온에 대한 생리 반응기작으로써, 저 수온 환경에서는 외부로부터 어떠한 영양공급도 받지 않은 채 저층의 기질에서 일정기간 동안 활동을 멈추고 체내의 에너지를 절약하며 적당한 소상시기가 될 때 까지 대사활동을 유지하는 것으로 생각된다(Jellyman, 1977; Michaud *et al.*, 1988).

또한 본 연구 결과 실뱀장어의 산소 소비율은 21.5°C 부근에서 최대값을 보였으며 21.5°C 이상 수온 범위에서는 감소하는 현상이 나타났다. 이러한 현상은 Tzeng (1985)의 연구 결과에서도 잘 나타나 있는데, Tzeng의 경우, Taiwan estuary에서 실뱀장어를 채집한 지역의 수온과 채집 자료를 분석한 결과, 19°C 이상 수온이 상승하게 되면 실뱀장어는 하구나 연안지역에 출현하지 않는다고 보고하였다. 이러한 결과는 실뱀장어가 19°C 이상 수온이 상승하기 전에 상류로 이동한다는 것을 의미하는 것으로써, 본 연구 결과에도 21.5°C 부근에서 산소소비율의 기울기 변화가 뚜렷하게 관찰된 것으로 볼 때 19°C와 21.5°C의 수온은 실뱀장어 소상의 한계 수온과 연관성이 있을 것으로 추정된다.

주기적인 수온변동에 따른 생물의 산소소비 반응을 관찰한 결과, 실뱀장어는 1°C의 수온변화에도 민감하게 반응하였는데, 이러한 현상은 Kim *et al.* (2002)의 연구 결과에서도 잘 나타나고 있다. Kim *et al.* (2002)은 자연에서 채집한 실뱀장어를 이용하여 수온 변동에 따른 실뱀장어의 산소소비율을 측정하고, 실뱀장어가 수온변화에 민감하게 반응한다는 것을 보고하였

다. 또한 실뱀장어의 산소소비는 조석주기나 일주기와 상관없이 실험 과정에서 설정된 수온 변동 주기(14 시간)와 유사한 패턴으로 진행되었는데, 이러한 결과들은 실뱀장어의 경우, 1℃의 미세한 수온 변화에도 생리적으로 민감하게 반응할 수 있다는 것을 시사해 주는 결과이다.

제 3 절 염색 표지 방류 방법을 이용한 제주 천제연 하구 실뱀장어 자원량 추정

1. 서론

실뱀장어는 크기가 작아 부착 표지(tags)를 이용하기 어려워 염료를 이용하여 착색하는 방법이 주로 사용된다(Tzeng, 1984; Jessop, 1997, 1998). 여러 종류의 어류 피부착색용 중성 염료가 알려져 있으나, 어류에 따라 부작용이 있고 착색 시간이 길지 않은 단점이 있다(Bagenal, 1977). 본 연구에서는 지금까지 알려진 소형 어류 표지 염료들을 실험수조에서 시험하여 실뱀장어에 미치는 영향, 염료 지속 시간을 추정한 후 현장에 적용하였다.

실뱀장어는 바다에서 하구역에 도달하면 다시 바다로 돌아가지 않고 하천으로 오르기 때문에, 하천으로 오르는 수로를 차단하면 하구는 폐쇄된 서식처로 볼 수 있다. 제주도 천제연 하구는 비교적 면적이 좁고, 하구에는 보가 설치되어 작은 수로를 통하여 하천으로 연결되어 있다. 본 연구에서는 보에 설치된 수로를 그물로 차단한 후 하구역을 하나의 폐쇄된 공간으로 보고 표지 방류하여 자원량을 추정하였다.

2. 재료 및 방법

피부 착색용 중성 염료는 부착용 표지 방류가 어려운 자치어를 비롯한 소형어류 표지로 이용되어진다. 이 용도로 널리 이용되어지는 Neutral Red, Bismarck brown, Acridine orange, Sudan black과 Toluidine blue로 실험실에서 실뱀장어를 염색하여 관찰한 결과, Sudan black은 염색이 되지 않았고, Toluidine blue는 머리 부분만 염색되었으나 수 시간 내에 탈색되었다(표 10). Acridine orange는 1/50,000 농도에 노출하였을 때 24시간 후 100%가 사망하였다. Neutral red와 Bismarck brown은 1/50,000 농도에 30분간 착색시켰을 때 사망률도 없었고, 3일 이상 식별이 가능하여 이 두 염료를 이용하였다. 그러나, 현장 실험에서는 이 두 염료도 2일 후에는 잘 구분되지 않아 1일 후 자료만을 이용하였다.

제주도의 하구역에는 12월에서 5월 사이 실뱀장어가 나타나며, 주로 1월에서 3월 사이 나타난다. 2001년 2, 3월 및 2002년 1, 2, 3월 제주 천제연 하구에서 주 소상시기인 그믐 전후 죽대를 이용하여 실뱀장어를 잡아 표지 방류실험을 수행하여 자원량을 추정하였다.

표 10. 소형 어류 염색에 이용되는 중성 염료의 농도 및 염색 시간에 따른 염색 정도와 어류 행동

Dye	Concentration	Duration (min)	Behavior after staining	Persistence of staining(d)	Colour of stained fish	Mortality rate(ind/d)	Reference
Acridine orange	1:100,000	30	Normal	1.5	Orange(snout)	0% / 2 d	X
	1: 50,000	30	Some abnormality	3	Orange	40% / 2 d	X
Sudan black	weak solubility						X
Toluidine blue	1: 50,000	30	Normal	1	Light blue	20% / 2 d	X
Nile blue	1:450,000	24 h	Normal	14	Blue	-	X
Methylen blue	1: 40,000	24 h	Normal to very abnormal	Irregular, 0.25 - 3	Blue	-	X
Nile blue	1:450,000	24 h	Normal	14	Blue	-	X
Biebrich scarlet	1:10,000	24 h	Some abnormality	0.25 - 0.5	Pink	-	X
Bismarck brown	1:50,000	30	Normal	3	Deep orange	0% / 3 days	⊙
Neutral red	1:50,000	30	Normal	2.5	Light red	1%, 3 days	⊙

3. 결과 및 토의

각 조사 시기 첫 날 잡은 실뱀장어를 염색(mark)하여 고르게 방류한 후, 1 일 후 잡힌 개체(catch) 중 재포(recapture)된 개체를 구분하였다. 3개의 정점에서 채포율은 정점에 따라 유의한 차이를 보이지 않아 표지 방류한 어류들이 비교적 고르게 분산된 것을 알 수 있었다(표 11).

자원량 추정 및 신뢰 구간은 Chapman의 식을 이용하여 계산하였다(표 12). 각 조사 시기에 서로 다른 표지를 이용하여 추정된 자원량은 유의한 차이를 보이지 않았다. 해에 관계없이 1월의 자원량은 2월의 약 50% 정도였고 3월은 2월의 30% 정도로, 주 소상시기인 1~3월 중 2월에 소상량이 가장 많은 것으로 추정된다. 2002년의 자원량은 2001년 자원량의 41~44% 수준이었다. 각 조사 시기 단위노력당 어획량(/man/day)은 추정된 자원량과 1차 비례하여(그림 26), 단위노력당어획량을 추정하면 연 변화 경향을 평가할 수 있을 것이다

표 11. 각 조사 시기 표지 방류한 실뱀장어의 재포율

Year	site	St. 1	St. 2	St. 3	Mean	Dye
	Date					
2001	25-Feb	1.3	1.8	2.6	1.9	Bismarck brown
	25-Mar	24.0	12.0	10.1	15.4	Bismarck brown
	26-Mar	11.0	7.7	7.9	8.9	Neutral red
2002	15-Jan	13.6	14.5	9.6	12.6	Bismarck brown
	17-Jan	14.3	34.2	31.6	26.7	Neutral red
	15-Feb	7.2	19.7	18.2	15.0	Bismarck brown
	15-Mar	17.1	19.5	27.0	21.2	Bismarck brown
	16-Mar	8.8	20.6	25.5	18.3	Bismarck brown
	16-Mar	10.5	17.6	35.2	21.1	Neutral red
Total	Mean±SD	12.0±6.4	16.4±9.1	18.6±11.7	15.7±7.4	
		12.0±8.0	14.7±7.2	15.5±9.7	14.1±6.7	Bismarck brown
		11.9±2.1	19.8±13.4	24.9±14.8	18.9±9.1	Neutral red

표 12. 2001년과 2002년 표지 방류개체수(M), 재포개체수(r) 및 Chapman 식으로 계산한 총개체수(N)과 신뢰구간(CI)

Year	Date	C	M (B. brown)	M (N. red)	r (B. brown)	r (N. red)	N	CI ($\alpha=0.05$)
2001	Feb. 23		334					
	Feb 25	892			18		15745 ± 6827	8918 ~ 22572 B. brown
	Mar 25	727	418	720				
	Mar 26	721			54	96	5500 ± 1385 5367 ± 988	4116 ~ 6885 B. brown 4379 ~ 6354 N. red
2002	Jan 14	181	390					
	Jan 15	268			34		3005 ± 916	2090 ~ 3921 B. brown
	Jan 16	600		697				
	Jan 17	300				75	2764 ± 534	2231 ~ 3298 N. red
	Feb 14	1072	1027					
	Feb 15	626		621	93		6857 ± 1271	5586 ~ 8128 B. brown
	Mar 14	393	388					
	Mar 15	545	421		119		1770 ± 279	1491 ~ 2049 B. brown
	Mar 16	360			60	76	2497 ± 567 1978 ± 389	1931 ~ 3064 B. brown 1589 ~ 2368 N. red

** C: catch; M: marked glass eel; r: recapture N: estimated population; CI: confidence interval
B. brown: Bismarck brown; N. red: Neutral red

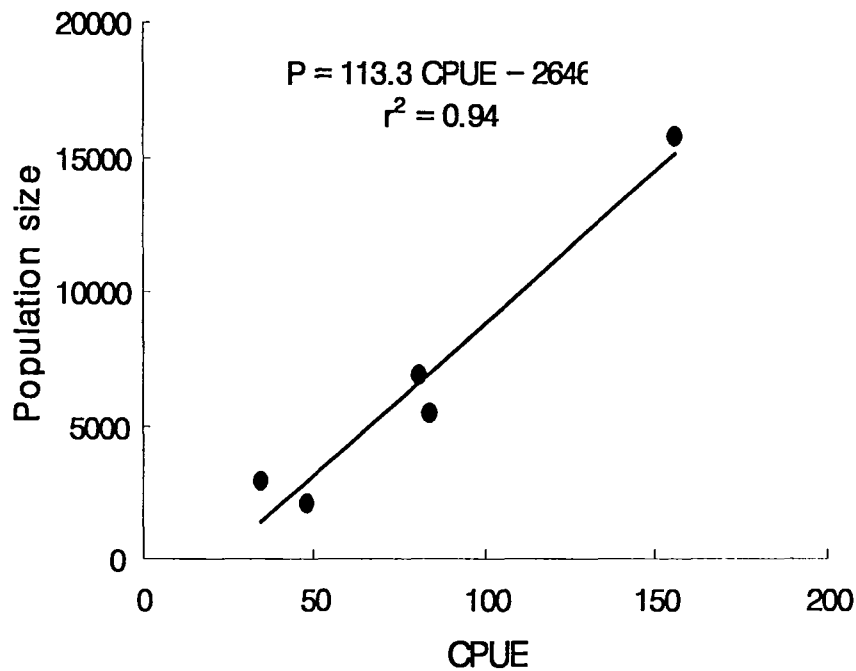


그림 26. 자원량과 단위노력당 어획량(CPUE, 1인당 1시간 채집 개체 수)과의 관계

2003년 2월에는 2001-2002년과 같은 방법으로 표지 방류 후 1일 후 재포하여 총개체수($N \pm SD$)가 9013 ± 460 마리였다.

2003년 3월과 4월에는 첫날에는 Bismarck brown으로 둘째 날에는 Neutral red로 구분 염색하여 셋째 날에는 염료별로 구분하여 재포수를 관찰하였다. 2001-2002년과 2003년 2월에는 30분간 염색하여 2일 후에는 탈색되어 구분이 어려웠으나, 2003년 3월과 4월에는 염색시간을 90분 염색한 결과 2일 후에도 식별이 용이하였다.

2003년 2월에는 총개체수($\pm SD$)가 2003 ± 460 마리로 추정되었다. 3월에 총개체수는 4873 ± 673 으로 2월의 54% 정도였고, 4월에는 3월보다 적은 3983 ± 412 마리로 추정되었다. 생산률은 3월에 1.01 ± 0.22 로 1p 가까웠으나, 4월에는 0.67 ± 0.063 으로 낮았다.

하루동안 실뱀장어의 생산률은 이론적으로 1에 가까워야 하나 4월에 낮은 값은 조사 해역의 다른 곳으로 이동한 것으로 볼 수 있다. 3월의 경우 낮에는 조차가 커서 보의 수로로 물이 넘치나 밤에는 넘치지 않아, 보에 설치된 그물에는 실뱀장어가 잡히지 않았다. 그러나, 4월에는 밤과 낮 모두 만조 때 보로 해수가 넘쳤고, 보에 설치된 그물에 136 마리의 실뱀장어가 채집되어 4월의 낮은 생산률은 보를 통하여 실뱀장어가 하천으로 이동한 결과로 볼 수 있다.

가입률(R_{23})은 3월에는 2.87 ± 2.48 로 높았고, 4월에는 1.30 ± 0.47 로 낮아, 3월에 비하여 4월에는 외해로부터 하구로 들어오는 실뱀장어가 적음을 알 수 있었다(표 13).

표 13. 2003년 2월에서 4월 그물 사리 때 천제연 하구에서 염색 지 방류 방법으로 추정된 자원량(N), 생산률(S) 및 가입률(R)

Time	Marked	Capture	Recapture	$N \pm SD$			
02-Feb	1387			9013 ± 460			
03-Feb		2103	323				

Time	Marked	Capture	Recapture		N_2	S_{12}	R_{12}
			NR	BB			
02-Mar	620	-	-	-		1.01 ± 0.22	
03-Mar	1537	1543	264	-	4837 ± 673		
04-Mar		706	94	173			2.78 ± 2.48

Time	Marked	Capture	BB	NR	N_2	S_{12}	R_{12}
01-Apr	1779	-	-	-		0.67 ± 0.063	
02-Apr	840	1200	358	-	3983 ± 412		
03-Apr		1121	275	193			1.30 ± 0.47

제 4 장 실뱀장어 어획량 변동

제 1 절 아시아 4개국 실뱀장어 어획량 변화

실뱀장어는 사매매가 많아 공식적으로 보고되는 자료는 전체의 일부에 불과하다. 따라서, 각 국의 연간 총 채포량 자료는 각 국의 양만조합이 전체 양식장에 입식된 자국의 실뱀장어 양으로부터 추정된 자료이다. 각 국의 자료가 제공되기 시작한 때가 서로 달라 전체적인 경향을 추정하기가 쉽지 않지만, 해에 따른 변동의 폭이 상당히 큰 편이다. 일본의 경우 1980년 전후 100 mt로 최대값을 보이고 그 이후 감소하여 근래에는 20-30 mt 정도이다. 한국도 일본과 같이 1970년대 후반에 채집량이 많았으나 그 이후 감소하여 1980년부터는 4-8 mt 사이이다. 대만과 중국은 특히 연변동 폭이 큰 편이다(그림 27).

아시아 3개국 연도별 실뱀장어 어획량 간의 상관관계를 계산한 결과 한국의 어획량은 일본이나 대만의 어획량과 유의한 상관관계를 보이지 않았고 전체와는 약한 상관관계를 보였다(그림 28). 일본과 대만의 어획량은 약한 상관관계를 보였다. 일반적으로 실뱀장어 어획 자료는 신뢰도가 낮고, 여러 가지 요인들이 복합적으로 작용하기 때문에 총 어획량으로 직접 상관관계를 추정하기는 어려움이 있다. 일반적으로 실뱀장어 어부들은 가격이 높으면 어획 강도가 높고, 일본의 경우 일정량이 어획되면 어획을 중단하여, 각국의 자료 비교를 위해서는 CPUE 등의 비교가 필요하나 이 자료들은 구하기가 어렵다.

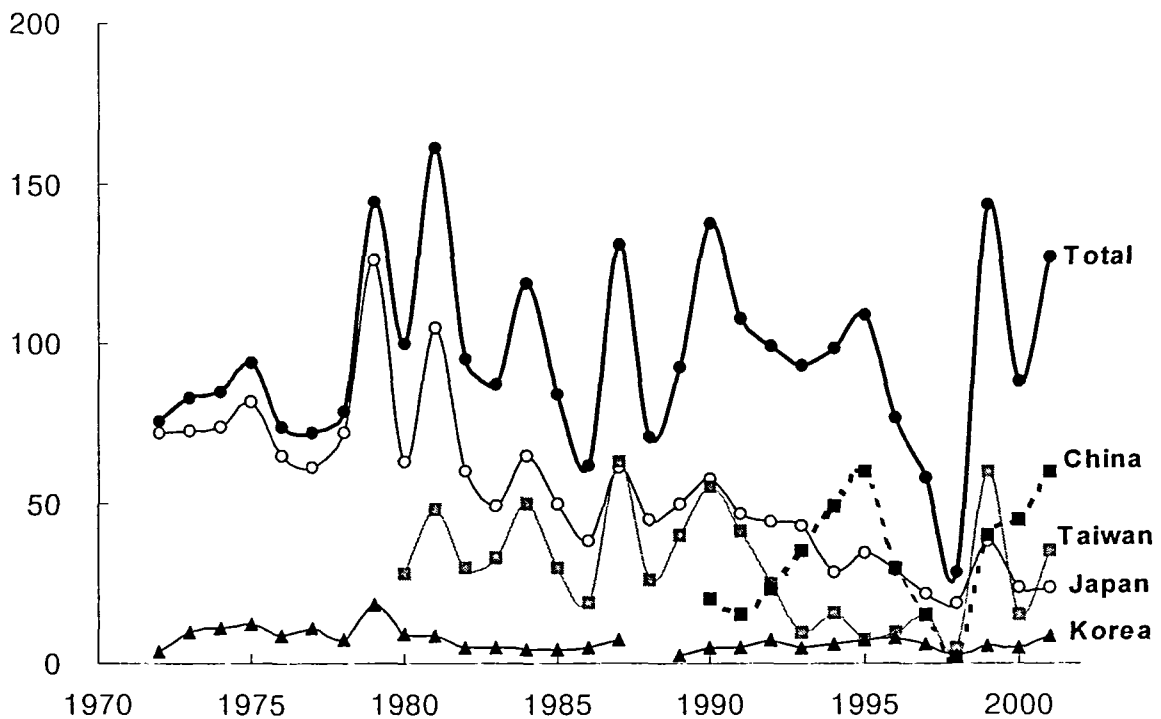


그림 27. 1970년 이후 아시아 4개국의 실뱀장어 어획량 변동

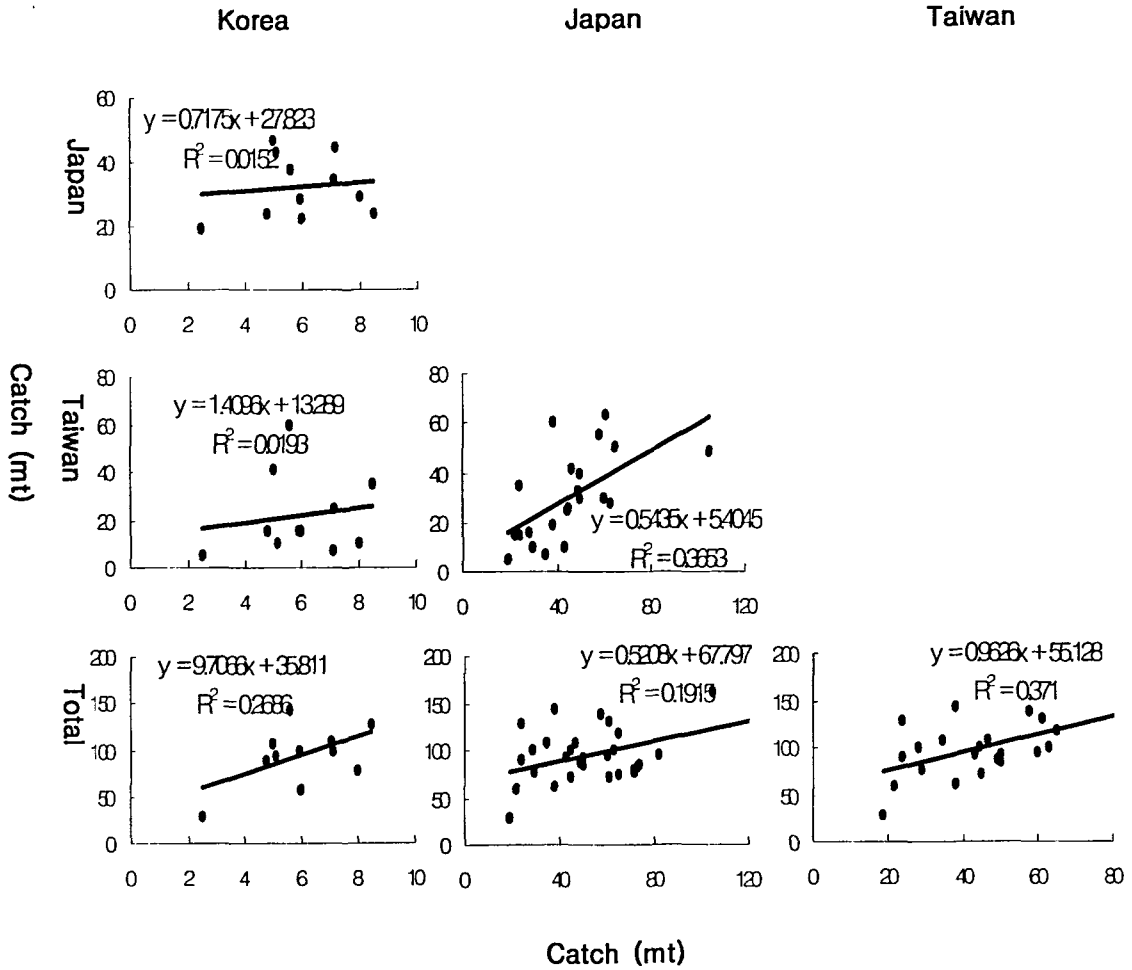


그림 28. 아시아 3개국 연도별 실뱀장어 어획량 간의 상관관계

제 2 절 국내 하구 실뱀장어 채포량 증장기 변동

1. 자료수집

어부들이 잡은 실뱀장어는 현지의 소규모 수집상에게 판매되고, 중간상들이 이를 수집하여 양식장에 공급하는 3 단계의 유통과정을 거친다 (그림 29). 현지 수집상 가운데에는 어부들로부터 실뱀장어를 구입할 때, 판매한 어부와 판매일을 기록한 장부를 가지고 있어 가가 하구역의 현지 수집상을 탐문하여 그 기록 장부를 입수하여 정리하였다. 제주도에서는 1991년에서 1999년 사이, 영광과 금강에서는 1996년에서 2002년 사이 자료를 입수하였다. 중간상들의 일일 구입 자료는 실제 잡힌 날과 차이가 있을 수 있어 가능한 그 출처를 파악하여 가능한 범위에서 자료 신뢰도를 높였다. 우리나라 전체 실뱀장어 어획량은 양만수산업협동조합에 보고된 각 양식장의 입식된 실뱀장어 양으로부터 추정된 자료를 이용하였다.

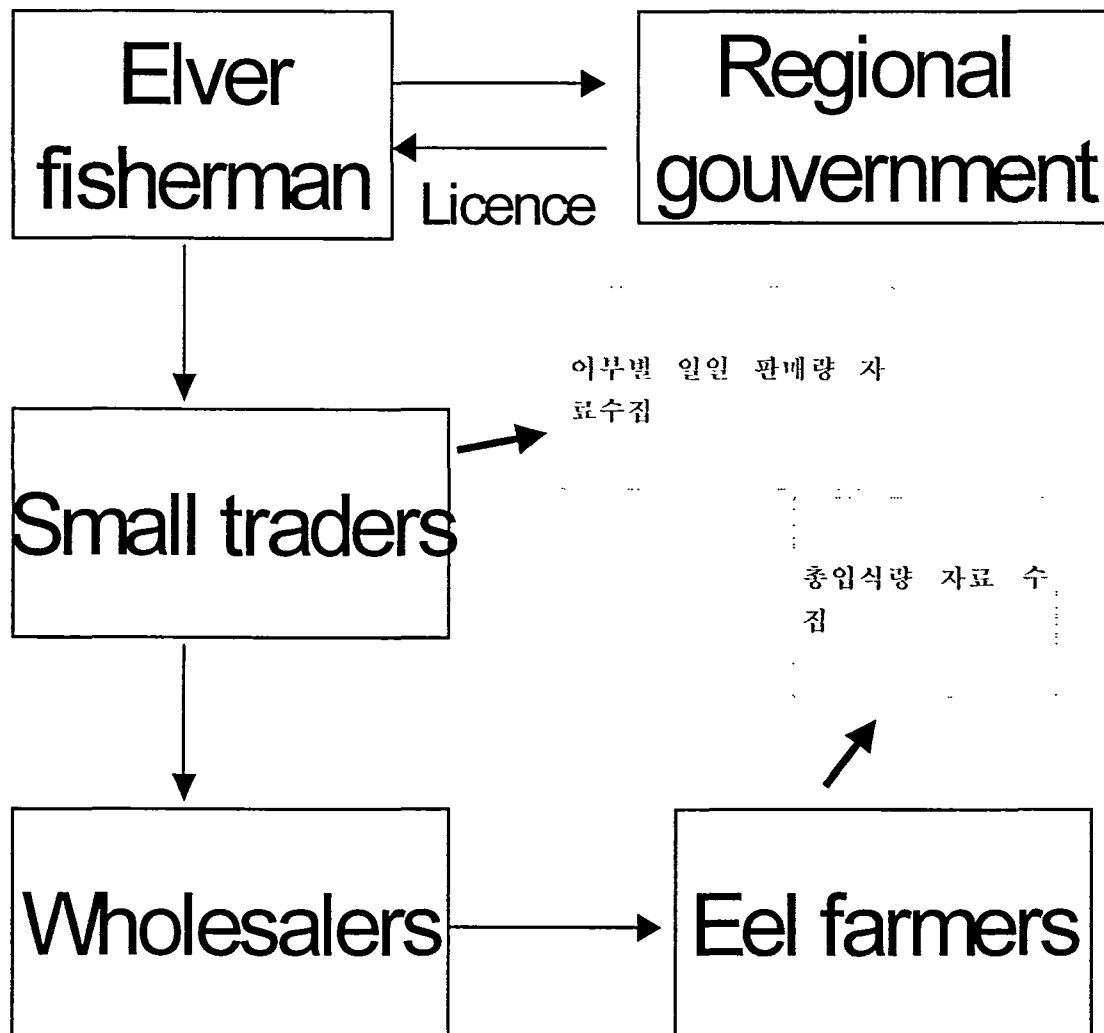


그림 29. 실뱀장어 유통과정과 자료 수집

2. 실뱀장어 채포량의 단기 및 연변동

1991년에서 1999년 사이 제주도에서 채포된 실뱀장어의 일일 변동량은 해에 관계없이 그믐 때 극대치를 보였다. 그러나 채포 시작 시기나 채포기간은 해에 따라 큰 변동을 보였으며 2 가지 type으로 구분되었다(그림 30).

1991년 type은 1월초부터 실뱀장어가 어획되기 시작하여 4월 말까지 약 4개월간 어획기간이 긴 경우로, 92, 93, 95, 96년이 이에 해당된다. 이와 같은 해에는 일반적으로 1월의 수온이 14 °C 이하가 되는 날이 많은 해였다. 1996년 같이 1월 초부터 수온이 낮은 해에는 특히 어획기간이 길어 다른 해보다 약 1개월 긴 5월 말까지 어획되었다. 1994년 type은 1월 말 즈음부터 실뱀장어가 어획되기 시작하여 상대적으로 어획기간이 짧은 경우로, 97, 98, 99년이 이에 해당된다. 이와 같은 해에는 일반적으로 1월 초에 14 °C 이상의 고수온을 보이고, 어획 기간 동안 전반적으로 수온이 높은 해들이다.

이와 같은 결과는 앞 절에서 수온 변화에 따른 산소 소모량 변화 결과에서와 같이 실뱀장어가 대륙붕에서 강하구로 회유할 할 때 외부의 먹이를 섭취하지 못하기 때문에 저수온에 머물러, 하구가 14 °C 저수온일 때 실뱀장어의 소상량이 높은 것으로 판단된다(Lee and Kim, 2001). 영광과 금강의 경우는 수온이 5 °C 이상으로 상승하는 2월 말부터 어획되기 시작하여 수온이 8 °C 내외인 3월에 최대값을 보이고 5월말 수온이 16 °C 정도 될 때까지 어획되었다(그림 31). 일변동은 매월 보름과 그믐에 극대값을 보여 제주도의 경우와는 달랐다. 이것은 앞 절의 금강 실뱀장어 단기 변동에서 살펴본 것과 같이 이곳에서는 개량 안강망으로 밀물 때 조업하기 때문에 어획량은 조류의 속도와 관계가 깊은 것으로 추정된다. 해에 따른 변동은 제주도와 같아 1996, 1997 및 2001년에는 상대적으로 어획기간이 짧아 연아 수온이 실뱀장어의 소상에 영향을 주는 것을 알 수 있었다.

실뱀장어의 어획량은 뱀장어 산란장으로 알려진 북적도 해류 복단에 형성되는 염분전선이 일반적으로 북위 17도 부근에 형성되며, El Nino 해에는 이 염분 전선이 북위 7도까지 남하한다는 사실을 발표하였고, El Nino 해에 (SOI index가 낮은 해)에 동북아 실뱀장어 어획량이 낮아지는 현상을 보고하였다(Kimura et al., 2001).

국내 3개 하구의 실뱀장어 연도별 어획량은 하구에 따라 약간씩 다르지만 전체적으로 1998 에 낮은 값을 보였다. 그러나, 자료 수집 기간이 짧아 장기간 변동을 파악하는 데는 무리가 있다. Kimura et al. (2001)에서도 1987년의 경우 El Nino 해임에도 불구하고 상대적으로 높은 값을 보였고, 2003년의 경우 El Nino해임에도 불구하고 다른 해에 비해 높은 어획량을 보여 SOI index와 관계를 구명하기 위해서는 앞으로 지속적인 자료 축적이 요구된다.

국내 하구역간 연도별 어획량의 상관관계를 분석하였다(그림 32). 자료가 수집된 국내 3개 하구역과 국내 전체 어획량은 서로 유의한 상관관계를 보였다. 이 결과는 국내 하구로 소상하는 실뱀장어의 양이 하구에 따라 차이가 없음을 나타낸다. 따라서 제주도는 서남 하구역 보다 한달 일찍 소상하기 때문에 제주도의 초기 실뱀장어 자원량을 추정하면 서남 하구역의 소상량을 1-2 개월 먼저 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

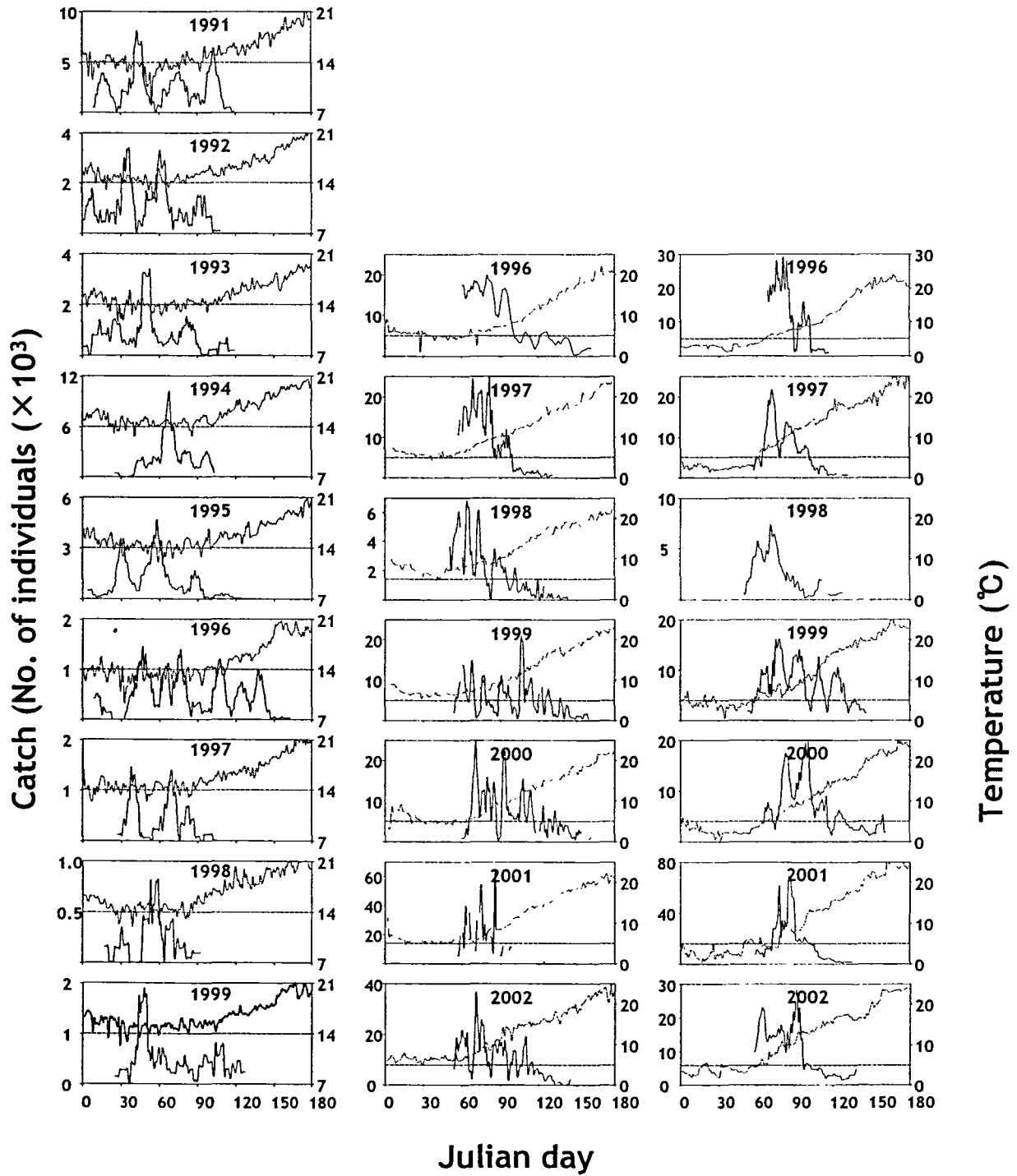


그림 30. 제주도, 및 낙동강 하구 일일 채포량의 일변동과 연안 수온의 변화

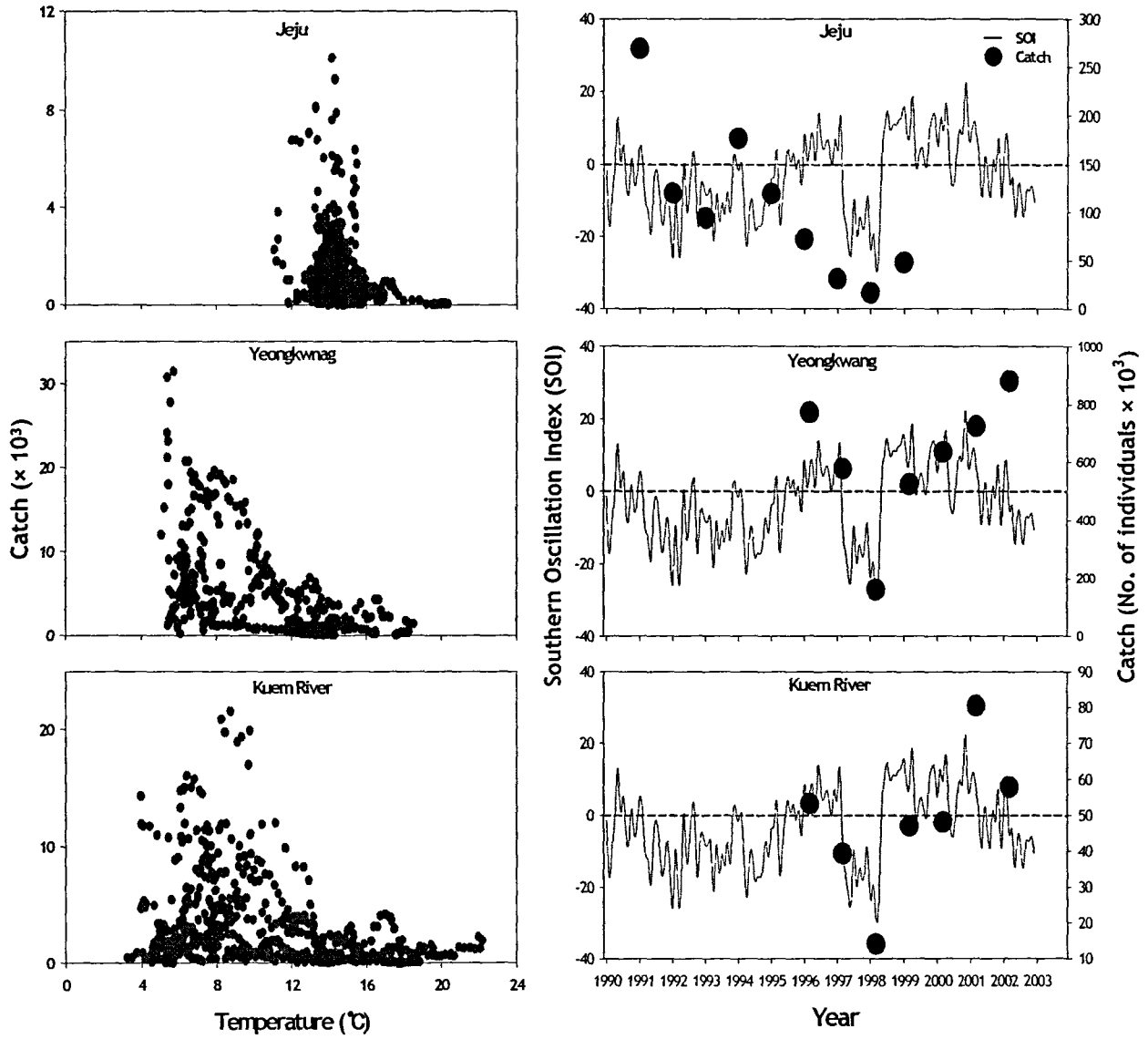


그림 31. 제주도, 영광 및 금강 하구의 수온에 따른 실뱀장어 일일 채포량(좌)과 연도별 SOI index 와 실뱀장어 채포량 변동

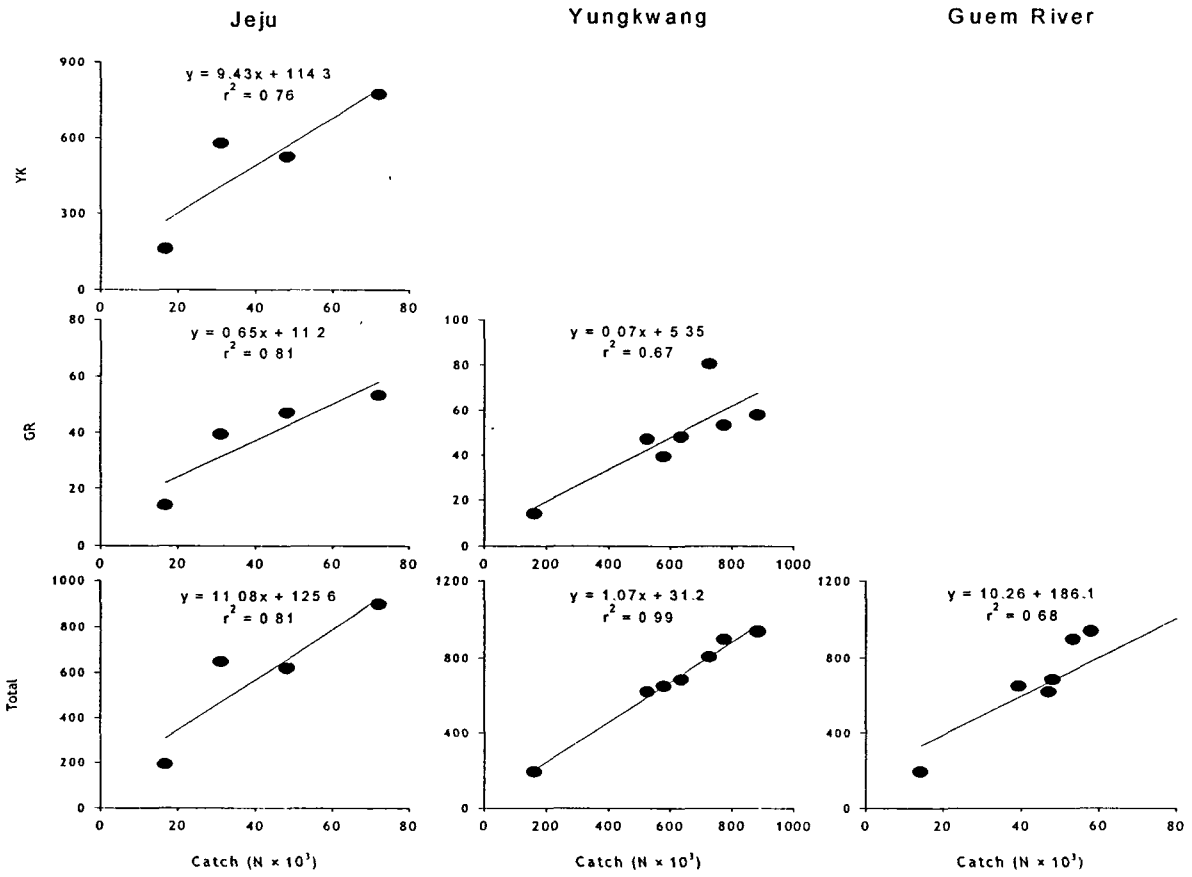


그림 32. 제주, 영광(YK), 만경(MK) 및 금강(KR) 하구역 실뱀장어 상대 어획량간의 상관관계

제 3 절 실뱀장어 자원량 예측 방안

1. 남방진동지수(SOI)와 실뱀장어 어획량과의 관계

동북아산 뱀장어 *Anguilla japonica*는 4월에서 7월 사이 동경 140도, 북위 15도 내외의 Marana Ridge 부근의 북적도 해류 북단의 염분전선에서 산란하여 북적도 해류를 따라서서로 이동한 후 Kuroshio 해류로 들어와 동북아로 회유한다(그림 33, 2장 1절 참조). 산란장으로 알려진 염분 전선은 북적도 해류와 아열대에서 생성된 고염의 쿠로시오 환류가 만나 형성된다. El Nino 해에 서태평양의 warm pool이 줄어들며 염분 전선은 적도 방향으로 이동하여 쿠로시오 해류로 들어오던 북적도 해류수의 일부가 Mindanao 해류를 따라 남반구 쪽으로 이동할 가능성을 제시하였다. El Nino해에는 염분 전선이 남하하여 어미가 염분전선에 도달하기 어렵거나 어미가 제대로 염분전선에 도달하여 산란하였어도 염분전선을 따라 회유하던 뱀장어가 쿠로시오로 들어오는 양이 적어져 결국 실뱀장어 어획량이 줄어들 것으로 예측되었다. El Nino해에 SOI index는 음의 값을 가지며 수개월의 시차를 두고 서 태평양 염분 전선을 남하시키기 때문에 SOI index가 강한 음의 값을 가진 1998년의 경우 동아시아 전체 실뱀장어 어획량이 평년의 30% 이하로 감소하였다(4장 2절 참조). 그러나, 1986년이나 2002년의 경우 SOI 값은 음의 값을 가졌으나 다음해인 1987년과 2003년의 경우 실뱀장어 어획량은 크게 줄지 않아 예외적인 경우도 있었다.

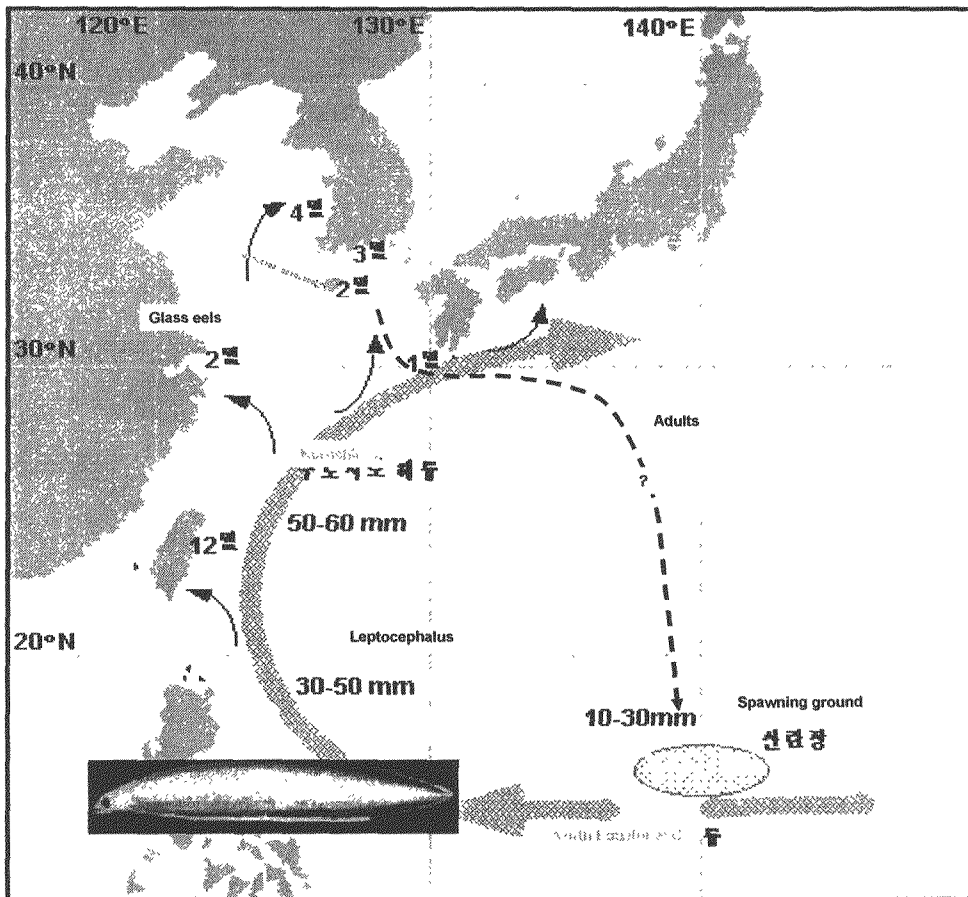


그림 33. 뱀장어의 회유로

2. 대륙붕 수온과 실뱀장어 소상량과의 관계

뱀장어가 쿠로시오 대륙사면 이전에서 실뱀장어로 변태한 후, 실뱀장어는 대륙붕을 회유하여 강 하구에 이른다(2장 2절 참조). 이 회유기 수개월 동안 실뱀장어는 먹이를 먹지 못하고 체내에 축적된 에너지를 이용하여 회유하기 때문에 낮은 수온을 따라 이동하는 것으로 추정된다. 본 연구에서 수온을 변화 시키며 산소소모량을 측정한 결과 실뱀장어는 수온변화에 매우 민감하며 5 °C에서 13.5 °C까지는 산소소모량이 일정하게 낮은 값을 유지하여 실뱀장어가 대륙붕에서 13.5 °C 이하의 낮은 수온을 따라 회유하는 것으로 추정되었다(3장 2절). 또, 동북아산 실뱀장어가 대만, 일본 남부 및 제주도과 같은 따뜻한 해역에서는 수온이 낮은 계절에 소상하고, 국내 서남 하구에서는 2월에 수온이 5 °C 이상으로 상승하는 계절에 소상하는 것이 간접적으로 실뱀장어가 대륙붕에서 낮은 수온을 따라 회유하는 것을 증명한다. 1991년에서 1999년까지 9년간 실뱀장어의 어획량 분석 결과에 의하면 1월의 연안 수온이 14 °C 이하로 낮을 때 실뱀장어 어획량이 높아지고, 소상기에 고수온이 지속되면 소상량도 줄고, 소상 기간도 짧아지는 것이 관찰되었다(4장 2절). 따라서 제주도 연안 수온 변화가 실뱀장어 소상량을 추정하는 지표가 될 수 있다.

3. 각 하구역 실뱀장어 소상량의 상관관계

국내 실뱀장어의 연도별 총 어획량은 대만 및 일본의 어획량과 유의한 상관관계를 보이지 않았다(4장 1절). 이 결과는 한국보다 일찍 실뱀장어가 소상하는 대만이나 일본의 어획량으로 국내 실뱀장어 소상량 예측이 어렵다는 것을 뜻한다. 그러나 실뱀장어 어획 통계는 신뢰도가 낮고, 실뱀장어 자원 관리가 국가에 따라 달라 어획량으로 보기는 어려워 특정 하구에서 신뢰도 높은 소상량 자료를 추정했을 때는 비교가 가능할 수도 있다.

국내의 제주도, 영광 및 금강 하구 및 총 어획량은 서로 유의한 상관관계를 보였다(4장 2절). 제주도 하구에는 서남하구 보다 약 1-2개월 일찍 실뱀장어가 소상하기 때문에 제주도 실뱀장어 소상량을 추정하면 1-2개월 후 서남 하구의 실뱀장어 소상량의 상대값을 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 제주도는 2000년 이후 실뱀장어 가격이 폭락한 후 실뱀장어 조업이 거의 중단되어 직접 소상량을 추정할 수밖에 없다. 천제연 하구에서 2001년에서 2003년까지 주 소상 기간 동안 염색 표지 방류 방법을 이용하여 실뱀장어 자원량을 추정하였고, 이 값은 어부당 1일 채포량(CPUE)와 유의한 상관관계를 보여(3장 1절), 예측 자료로 이용할 수 있음이 밝혀졌다.

4. 실뱀장어 자원량 예측 방안

이상의 3가지 결과를 종합하면, 실뱀장어 자원량을 예측하기 위해서는 SOI index, 제주도 연안 수온변화를 추적하고, 제주도에 소상 초기 실뱀장어 자원량을 추정하면 서남 하구의 소상량의 상대값을 추정할 수 있을 것으로 추정된다.

제 5 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

○ 뱀장어의 산란기, 초기 성장 추정

- 산란장 주변에서 1991년에서 2002년까지 채집된 뱀장어의 체장조성 및 이석의 미세구조를 이용하여 산란기 및 초기 성장을 밝힘

>>뱀장어의 정확한 산란장 추정에 이용가능

- 한국 3개 하구역에서 소상 기간 동안 월별로 실뱀장어를 채집하여 색소 발달 단계, 체장 조성 및 이석 미세구조를 분석하여 비교하고 뱀장어 결과를 이용하여 대륙붕 회유기 성장 추정

>>실뱀장어 이석의 미세구조를 이용한 초기 생활사 해석에 새로운 방향 제시

○ 뱀장어의 소상생태와 소상 요인 분석

- 금강 하구에서 실뱀장어 소상기간 동안 일별로 어선 당 실뱀장어 평균 어획량을 계산하고, 소상에 미칠 수 있는 요인들(조차, 수온, 염분, 민물 방류량, 운량, 풍속 등)의 자료를 이용하여 소상 요인을 분석

>>어부들이 생각하는 소상 요인을 검증하였고, 실뱀장어 소상 요인 분석의 새로운 방안 제시

- 수온 상승 및 주기적 변화에 따른 실뱀장어 산소소모량을 측정하여 수온이 소상에 미치는 영향을 분석

>> 실뱀장어의 대륙붕 회유 행동을 해석할 수 있는 자료를 제시하였고, 수온의 소상에 가장 중요한 요인임을 구체적으로 밝혔다.

- 2001년에서 2003년 실뱀장어 소상 기간 동안 천제연 하구에서 표지 방류 방법을 이용하여 월별로 총 개체수를 추정하였고, 단위 노력당 어획량과 총개체수와의 관계를 분석

>> 실뱀장어 자원량을 추정할 수 있는 표지 방류 방법을 제시하였고, 이 방법을 이용하면 하구로의 가입량 및 하천으로의 소상량도 추정할 수 있어 실뱀장어 자원 평가에 널리 이용될 수 있다.

○ 소상량 예측을 위한 증장기 변동 요인 분석

- 아시아 4개국의 지난 10-20년간 실뱀장어 어획량 자료를 수집하여 각국 어획량의 상관관계 분석

- 제주, 영광, 금강 실뱀장어 중간 수집상으로부터 수년간의 어부별로 일별로 구입한 실뱀장어 마리수 자료를 수집하여 일변화, 연간 변화를 분석

- 제주, 영광, 금강의 연도별 어획량의 상관관계 분석 및 남방진동지수(Southern Oscillation Index)와의 관계 분석

제 6 장 연구개발결과의 활용계획

1. 활용 전망

가. 사회 경제적 측면

- 실뱀장어 예측 방안은 수산과학원에서 실뱀장어 수입량 조절을 위한 회의에서 기초 자료로 이용할 수 있다. 현재까지의 회의는 자료에 기반 없이 이해 당사자들 간에 협의에 의존하였으나, 본 연구에서 도출된 실뱀장어 생태 자료를 이용하면 보다 효과가 있을 것이다.
- 국내 실뱀장어 자원에 대한 체계적인 연구가 미비하였으나, 앞으로 본 연구 자료를 이용하여 하구 및 하천의 뱀장어 자원관리 기초 자료로 이용할 수 있다. 세계적으로 어류 자원이 감소하고 있으며, 특히 뱀장어는 심각한 상태로 본 연구의 생태 결과는 뱀장어 자원 증대 및 관리를 위한 효과적인 어도 개선, 뱀장어 방류 때에 이용할 수 있다.

나. 학술적 측면

- 본 연구과정에서 구체적인 뱀장어의 산란기, 초기 성장, 수온에 따른 산소소모량 변화 등을 처음으로 밝혀 앞으로 이 분야 연구에 활용될 수 있다.
- 염색 표지 방류 방법, 실뱀장어 이석 미세구조로 추정할 수 있는 한계를 밝혀, 이 방법들은 다른 어류를 생태를 연구하는데 활용될 수 있다.

2. 연구 성과

가. 국외 전문학술지 연구논문 발표

- Katsumi Tsukamoto, Tae-Won Lee and Hans Fricke. 2003. Spawning area of the Japanese eel. pp 121-140 in Eel Biology (eds, Aida et al.), Springer.
- K. Tsukamoto, T. Otake, N. Mochioka, T. W. Lee, H. Fricke, T. Inagaki, J. Aoyama, S. Ishikawa, S. Kimura, M. J. Miller, H. Hasumoto, M. Oya & Y. Suzuki. 2003. Seamounts, new moon and eel spawning: the search for the spawning site of the Japanese eel. Environmental Biology of Fishes 66: 221-229
- Wan Soo Kim, Seong Jin Yoon, Hyung Tae Moon, Tae Won Lee. 2002. Effects of water temperature changes on the endogenous and exogenous rhythms of oxygen consumption in glass eels *Anguilla japonica*. Mar. Ecol. Pr. Ser. 243: 209-216
- Lee, T. W. and W. S. Kim. 2001. Thermal effect on respiratory activities of glass eels at the different developmental stages. J. Taiwan Fish. Res. 9: 129-136
- Kim, J. H. and T. W. Lee. 2001. Eel culture in Korea. J. Taiwan Fish. Res. 9: 23-26
- Ishikawa, S. K. Suzuki, T. Inagaki, S. Watanabe, Y. Kimura, A. Okamura, T. Otake, N. Mochioka, Y. Suzuki, H. Hasumoto, M. Oya, M. Miller, T. W. Lee, H. Fricke and K. Tsukamoto. 2001. Spawning time and place of the Japanese eel *Anguilla japonica* in the North Equatorial Current of the western North Pacific Ocean.

(작성중인 논문)

- ▷ Annual variation in glass eel catch of *Anguilla japonica* in Korean estuaries
- ▷ Estimation of population size of glass eels by marking experiment in the Cheonjeyeon estuary of Jeju Island, Korea.
- ▷ Stock size, recruitment and upstream migration rates of glass eels estimated by a marking experiment in the Cheonjeyeon estuary of Jeju Island, Korea.
- ▷ Duration of leptocephalus and metamorphosis stages of *Anguilla japonica* as indicated from otolith microstructure in glass eels from the Korean estuaries.
- ▷ Factors affecting the daily catch of glass eels, *Anguilla japonica*, in the Geum-river estuary, Korea.

나. 국내 학술회의 발표

- 김완수, 윤성진, 이태원. 2003. Effect of salinity on endogenous rhythm of glass eels, *Anguilla japonica*. 한국해양학회 2003년 춘계학술발표대회 요약집. 제주대학교, 2003년 5월 15-16일. p180.
- 윤성진, 김완수, 이태원. 2003. 수온 변화에 따른 실뱀장어 *Anguilla japonica*의 산소 소비 반응. 한국수산학회 2003년 추계학술발표대회 요약집. 여수대학교, 2003년 10월 17일. p.
- 황선완, 황선도, 이태원. 2003. 염색 표지 방류를 이용한 제주 천제연 하구 실뱀장어의 자원량, 가입량 및 소상량 추정. 2003년도 수산관련학회 춘계 공동학술대회 요지집. 부산 BEXCO 컨벤션센터, 2003년 5월 16-17일. pp289-290
- 문형태, 노형수, 이태원. 2002. 엘리노가 한국 하구 실뱀장어 어획량에 미치는 영향. 한국해양학회 2002년 추계학술발표대회 요약집. 서울 한양대학교, 2002년 11월 14-15일. p142
- 이태원. 2002. 뱀장어 *Anguilla japonica*의 생활사. 한국어류학회 2002년 추계학술발표대회 요약집. 서울 코엑스, 2002년 11월 15일. p151
- 이태원·문형태·김광천. 2002. 뱀장어(leptocephalus) 이석의 미세구조를 이용한 산란일과 일일성장률 추정. 한국해양학회 2002년도 춘계 학술대회 요약집 p575. 부경대학교, 2002년 5월 17일.
- W. S. Kim, S.-J. Yoon, H. T. Moon, and T. W. Lee. 2002. Effects of water temperature changes on the endogenous and exogenous rhythms of oxygen consumption in glass eels, *Anguilla japonica*. 2002년도 춘계 수산관련학회 공동 학술대회 발표 요지록 p471. 부경대학교, 2002년 5월 17일.
- 문형태·김광천·황선도*·이태원. 2002. 염색표지 방류에 의한 천제연 하구 실뱀장어 자원량 추정. 2002년도 춘계 수산관련학회 공동학술대회 발표 요지록 p134. 전남대학교, 2002년 5월 9-11일,
- 이태원. 2001. 뱀장어 종묘 (실뱀장어) 생산의 과제. pp 80-87 In '서해 중부 연안 수산 증

양식 현황과 발전 방향'. 충남대학교 해양연구소. 2001년 11월.
 문형태 · 이태원 · 황선도. 염색 표지방류 방법을 이용한 제주 천제연 하구 실뱀장어 자원량 추정. 춘계 수산관련학회 공동학술대회. 국립수산진흥원. 2001년 5월
 이태원 · 문형태 · 김광천. 제주도 하구역 실뱀장어 소상량 증장기 변동. 춘계 해양학회 학술대회. 국립수산진흥원. 2001년 5월
 문형태 · 김광천 · 김완수 · 이태원. 실뱀장어 어획량의 연변동과 수온 적응 범위. 한국해양학회 2001년도 추계학술발표회. 한국해양연구원. 2001년 11월 2-3. p111.

다. 국제학술회의 발표

- Tae Won Lee, Hyung Tae Moon¹ and Sun Do Hwang. Annual variation in glass eel catch of *Anguilla japonica* in Korean estuaries. XII-th PICES meeting. October 13-17, 2003, Seoul.
- Tae Won Lee, Sun Wan Hwang and Sun Do Hwang. Stock size, recruitment and upstream migration rates of glass eels estimated by a marking experiment in the Cheonjeyeon estuary of Jeju Island, Korea. XII-th PICES meeting. October 13-17, 2003, Seoul.
- Hyung Tae Moon, Gwang Cheon Kim and Tae Won Lee. Duration of leptocephalus and metamorphosis stages of *Anguilla japonica* as indicated from otolith microstructure in glass eels from the Korean estuaries. XII-th PICES meeting. October 13-17, 2003, Seoul.
- Sun-Do Hwang, Won-Seok Yang, Young-Jo Jo, Hyeong-Tae Moon, Tae-Won Lee. Factors affecting the daily catch of glass eels, *Anguilla japonica*, in the Geum-river estuary, Korea. XII-th PICES meeting. October 13-17, 2003, Seoul.
- Wan-Soo Kim, Seong-Jin Yoon and Tae-Won Lee. Effects of sudden changes in salinity on the oxygen consumption of the glass eels *Anguilla japonica*. XII-th PICES meeting. October 13-17, 2003, Seoul.
- Wan-Soo Kim, Seong-Jin Yoon, Tae-Won Lee. 2003. The sensitivity of glass eels to water temperature changes. XII-th PICES meeting. October 13-17, 2003, Seoul.
- Lee, T. W., H. T. Moon, W.S. Kim and T. J. Stewart. 2003. Inter-annual variation in glass eel catch of *Anguilla japonica* in Korean estuaries. American Fisheries Society Annual Meeting, Quebec City, Canada. August 2003
- Lee, T. W., H. T. Moon and G.-C.. Kim. 2003. Early growth history of *Anguilla japonica* determined from otolith microstructure in glass eels. American Fisheries Society Annual Meeting, Quebec City, Canada. August 2003
- Kim, W. S., S. J. Yoon, H. T. Moon and T. W. Lee. 2003. Effects of water temperature changes on the endogenous and exogenous rhythms of oxygen consumption in glass eels *Anguilla japonica*. American Fisheries Society Annual Meeting, Quebec City, Canada. August 2003
- Sun Do Hwang, Won Seok Yang, Hyeong Tae Moon, Tae Won Lee. 2002. The factors

- affecting on the daily catch of glass eels in the Geum-River estuary, Korea. XI-th PICES meeting. October 21-25, 2002, Qingdo, China
- Lee, T. W., H. T. Moon, G. C. Kim and S. D. Hwang. 2002. Estimation of population size of glass eels by marking experiment in the Cheonjeyeon estuary of Jeju Island, Korea. The VIII International Congress of Ecology, August 11-18, 2002 Seoul, Korea.
- Lee, T. W., H. T. Moon, W. S. Kim and S. D. Hwang. 2001. Fluctuation of elver catch of Japanese eel *Anguilla japonica* in Korean water. The 10th Meeting of North Pacific Marine Science Organization. October 5-13, 2001. Victoria, B. C. Canada.
- T. W. Lee, H. Fricke and K. Tsukamoto. 2001. Spawning area and time of *Anguilla japonica*. Proceedings of the International Symposium 'Advances in Eel Biology', Sept. 28-30, 2001, University of Tokyo.
- T. W. Lee, S. D. Hwang, W. S. Kim and C. W. Park. 2001. Optimal Temperature Range of Glass Eels. Proceedings of the International Symposium-Advances in Eel Biology, Sept. 28-30, 2001, University of Tokyo.

라. 학위논문 지도

- 문형태. 2002. 실뱀장어 이석의 미세구조와 어획 자료를 이용한 뱀장어 *Anguilla japonica*의 초기 생활사. 충남대학교 대학원 박사학위논문. 111p.

3. 심포지움 주최 및 발표 (산학연 관련전문가 및 어민 대상)

가. 뱀장어 심포지움 (연구결과 중간 발표회)

- (1)주관: 서해수산연구소 군사 분소, 충남대학교 해양학과
- (2)장소 : 군산시 채만식 문학관
- (3)일시: 2002년 9월 25일
- (4)참가인원: 대학 및 연구소, 수산 관련기관, 양식업자 어민 등 70여명
- (5)발표집 발간 참석자에 배포

나. 양만기술 향상을 위한 연구발표회 발표

- (1)주관: 양만수산업협동조합
- (2)장소: 광주 수기동 제일오피스텔
- (3)일시: 2003년 3월 11일
- (4)발표 내용: 뱀장어의 생태

다. 뱀장어 자원 관리에 관한 워크숍 (연구결과 최종 발표회)

- (1)주관: 서해수산연구소 군사 분소, 충남대학교 해양학과
- (2)장소 : 군산 군장써미트 호텔
- (3)일시: 2003. 11월 18일

(4)참가인원: 대학 및 연구소, 수산 관련기관, 양식업자 어민 등 70여명

(5)발표집: 발표록 CD 참석자에 배포

라. 'Management of Eel Resources'

(1)PICES XII Annual Meeting의 topic session FIS S8으로 개최하였으며, 제 6차 동아시아 뱀장어자원 위원회(East Asian Eel Resource Consortium, EASEC) 개최

(2)장소: 서울 Mayfield Hotel (발표회 및 EASEC 6차 회의), Greenworld Hotel (양만수 산업협동조합 주최 reception)

(3)일시: 2003년 10월 15일

(5)참가인원: 일본, 대만, 인도네시아, 미국, 프랑스 학자 및 뱀장어 양식 관련 전문가 30여명과 국내 수산관련 전문가 50여명 참가

홍보실적(신문, 방송, 저널 등)

- 초등학교 국정교과서 국어 일기 5-2, 72-73 쪽 '뱀장어의 신비'
- 중앙일보. 2002. 12. 4. '6000 km 대장정-뱀장어 생태를 밝혀라'
- 월간 양식 21. 2004년 1월호. '실뱀장어 자원량 변동'
- 월간 양식 21. 2004년 2월호. '뱀장어 자원 현황과 자원 보전 대책'
- 부산방송 (PSB). 2004. 2. 29. '뱀장어 양식과 생태'

제 7 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

<뱀장어 자원 관리>

생물다양성 보전

근래에 전지구적 기후 변화로 생물 서식 환경이 변하며, 환경 보전과 자원의 지속 개발이 중요한 과제가 되었다. 1992년 유엔 환경개발 회의(UNCED)에서는 이 문제가 집중적으로 논의되어 기후변화 및 생물다양성에 관한 새로운 국제협약 '리우선언' 과 'Agenda 21' 채택되었다. 생물다양성협약의 서문은 인류를 위한 생물다양성 보존이 시급하다고 경고하고 있으며, 176개 국가가 이 협약을 비준하였다. 우리나라도 국제환경협약에 가입하는 한편, 생물다양성 당사국의 일원으로 이러한 협약이행에 적극 참여하고 있다. 이 협약의 주요골자는 생물 다양성의 보전과 지속적인 이용이다. 환경부 및 과기부를 중심으로 생물다양성 조사, 보전관리 및 지속적 이용에 관한 시책의 수립 및 지원의 확대를 위한 노력을 경주하고 있다. 해양수산부에서도 국립수산물과학원을 중심으로 수산자원 보전 및 지속적 이용을 위해서, 치어 방류 사업, 어장 환경 조성 사업 (인공 어초 투하, 연안 청소 작업 등) 등을 수행 중이다. 수산자원 중 어획량이 크게 감소한 종들은 개괄적으로 파악되었으나 구체적인 원인과 보전 대책은 미흡한 편이다.

어린 시절 바다나 하천가에 살았던 사람들은 하천이나 하구에서 뱀장어를 잡았던 기억을 가지고 있다. 그러나 근래에는 일부 하구에서나 뱀장어를 볼 수 있을 뿐, 자연산 뱀장어 보기가 어려워 졌고, 뱀장어 요리집에서나 양식한 뱀장어 구이를 먹을 수 있게 되었다. 뱀장어 요리집에서 판매되는 뱀장어는 양식산이며, 자연산 뱀장어는 자원량이 찾아보기 어렵게 되었다. 자연산 뱀장어 자원 감소는 우리나라에 국한된 것이 아니고, 전 세계적인 추세이다. 근래에 뱀장어 뿐 아니라 많은 어류 자원이 감소 추세에 있으며, 그 가운데 뱀장어가 가장 심각한 것으로 보고되었다. 본고에서는 전 세계적인 뱀장어 자원 현황과 자원 보전을 위한 대책들에 대하여 살펴보고, 국내의 문제점과 앞으로의 대안에 대하여 검토하기로 한다.

전 세계 뱀장어 자원 현황

2003년 8월 개최된 미국수산물학회의 주 주제가 '전세계적 어류 자원 감소' 였으며, 그 중 뱀장어 자원 감소가 중요한 주제였다. 2003년 10월 스페인에서 북대서양 수

산자원 및 내수면 자원위원회(ICES/EIFAC)에서도 뱀장어 자원 감소 문제가 논의되었다. 2003년 10월 서울에서 개최된 북태평양해양과학자 회의 (PICES meeting)에서도 본인의 주관하에 뱀장어 자원 관리에 관한 심포지움이 개최되어 한국을 포함한 일본, 대만, 인도네시아, 프랑스 등에서 80여명의 학자들이 모여 붕괴된 뱀장어 자원 관리에 방안이 논의되었다. 이 3개의 심포지움 후 국제적으로 저명한 과학 학술지 Nature (2003년 10월 2일, 그림 참조), National Geographics (10월 9일), Science Magazine (10월 10일) 등에 뱀장어 자원 감소의 심각성과 앞으로의 관리 방안에 대한 기사가 게재되었다. 미국수산학회에서 발행되는 월간지 'Fisheries'의 2003년 12월호(28권 12호)에는 '전세계 뱀장어 자원 감소와 즉각적 조처의 필요'라는 제목으로 뱀장어 자원 현황과 대처방안에 대하여 보도되었다(그림 참조).

nature
scienceupdate

updated at midnight GMT today is thursday, october 2

search nature science update

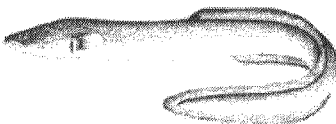
go
advanced search

- home
- content
- news
- features
- by subject
- conferences
- services
- send to a friend
- printable version
- e-alert
- search
- help
- feedback
- information
- about the site

World's eels on slippery slope

EU launches action plan to save threatened fish.
30 September 2003

TOM CLARKE



Freshwater eels spawn at sea but mature in estuaries.
© Michel Lambouef, FAO

The world's eels are disappearing fast and need protection before it's too late, fisheries scientists announced last week. Tomorrow the European Commission releases its 'Eel Action Plan' urging the European parliament to safeguard the region's threatened fish.

news

related stories

- North Sea fish have shrunk
25 September 2003
- Genome pioneer sets sights on Sargasso Sea
30 April 2003
- Fishy tales hide facts
20 November 2002
- Reserves raise fish stocks
30 November 2001
- Narrow Sargasso Sea
22 February 2001

linkout

- ICES

과학잡지 Nature의 뱀장어 자원 감소 기사
(<http://www.nature.com/nsu/030929/030929-1.html>)

Worldwide decline of eel resources necessitates immediate action Québec Declaration of Concern

The steep decline in populations of eels (*Anguilla* spp.) endangers the immediate future of these legendary fish. With less than 1% of major juvenile resources remaining, precautionary action must be taken immediately to sustain the stocks.

Eels are curious animals. Despite decades of scientific research, crucial aspects of their biology remain a mystery. In recent decades, juvenile abundance has declined dramatically (Figure. 1) by 99% for the European eel (*A. anguilla*) and by 80% for the Japanese eel (*A. japonica*). Recruitment of American eel (*A. rostrata*) to Lake Ontario, near the species' northern limit, has virtually ceased. Other eel species also show indications of decline. The causes of the

downward trends are yet unclear, in part due to the catadromous life history of these fishes,

cult to monitor and identify the cause of their population declines. This is in distinct contrast with other declining fishes such as anadromous salmon, whose spawning adults can be relatively easily surveyed when they return to freshwater to spawn, and Atlantic cod, which spawn relatively close to continental margins and can be surveyed by standard fishery techniques. 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, where eel fishing still constitutes a cultural tradition. Research is underway to develop a comprehensive and effective restoration plan. This, however, will require time. The urgent concern is that the rate of

The International Eel Symposium 2003 at the Québec City AFS Annual Meeting, convened by

미국수산학회 발행 월간지 Fisheries의 2003년 12월호(28권 12호) 뱀장어 자원감소 기사
참조: <http://www.fisheries.org/html/fisheries/F2812/F2812p28-30ccl.pdf>

지난 세기 동안 수많은 연구에도 불구하고 뱀장어의 생태는 아직 신비로 남아있다. 근래에 강의 뱀장어 자원은 크게 감소하여, 유럽뱀장어(*Anguilla anguilla*)는 99%, 동북아산 뱀장어(*A. japonica*)는 80%가 감소하였으며, 북미산 뱀장어(*A. rostrata*)는 분포의 북단인 온타리오 호수의 경우 거의 사라졌다. 다른 종의 뱀장어도 이와 비슷한 경향을 보였으며, 이러한 감소 경향의 원인은 아직 밝혀지지 않았다. 아직 산란 회유하는 뱀장어가 해양에서 채집된 적이 없어 성어들이 산란장으로 장거리를 제대로 회유하여 가는지 알 수가 없어, 자원감소 요인을 추적하고 그 원인을 밝기가 어려운 어종이다. 연어의 경우는 하천으로 소상하여 산란하기 때문에 성어 자원량을 추정할 수 있고, 대구도 연안에서 산란하여 성어 자원량 추정이 가능하여 자원 감소 요인과 그 원인을 분석할 수 있으나 뱀장어의 경우는 다른 어류와 달리 전 생활사를 직접 관찰할 수 없어 감소 요인을 추정하기 어렵다.

이러한 뱀장어 자원 감소는 전세계적 기후 변동으로 인한 성어와 치어의 해양 회유에 영향, 성장기 서식처인 강물의 수질 악화, 하구둑의 건설, 남획 등으로 산란할 수 있는 자원량이 감소한 것을 주요인으로 보고 있다. 뱀장어 자원 감소는 강과 하구역 종다양성에 상당한 영향을 미치고 있고, 뱀장어 어획량 감소는 사회 경제적으로도 상당한 영향을 미쳐 이 국제 자원의 관리를 위한 어떤 국제적인 조례(action)를 시급히 설정할 필요가 있다는 견해이다.

국내 하구의 뱀장어 자원은 하구에서 가장 중요한 수산자원이었으나, 자원 감소가 심각한 상태임에도 불구하고 이에 대한 기초 연구는 거의 수행되지 못하였다. 현재 전세계적으로 수행되고 있는 종다양성 보전 연구 수행 과정에서 뱀장어 자원에 관한 연구는 종다양성 보전의 주제인 자원 보전과 지속적 이용의 주 대상으로 국내에서도 시급히 연구가 필요한 중이다.



1960-70년대 평균 뱀장어 자원량을 100으로 보았을 때의 연도별 자원량 변화

국내 자원 관리 현황

국내에서도 동북아 뱀장어 자원 관리위원회의 제안에 따라 국제적인 공동노력이 필요하다. 그러나, 뱀장어 전문학자의 수도 적고, 자원 관리도 현실적으로 어려움이 많고 서북 태평양 산란장 조사에는 막대한 예산이 요구되어 쉬운 일은 아니다. 실뱀장어 자료는 상대적으로 쉽게 구할 수 있어, 지난 호(2004년 1월)에 보고한 것과 같이 저자가 한국수산개발원의 연구비 지원으로 실뱀장어 자원 현황 및 자원량 변동에 관한 연구를 수행하였다.

국내에서는 감소하는 수산자원 회복 및 관리를 위해서, 수산과학원과 지자체에서 치어 방류사업, 어초 사업 및 어도 설치 사업을 오래 전부터 수행하여 오고 있다. 근래에는 이러한 사업과는 별도로 해양수산부 지원으로 해양 목장화 사업을 수행하여 이미 남해 2개 지역에서 목장화 사업이 진행 중이고, 금년부터 동해, 제주도 및 서해에 한 해역씩 선정하여 연안 해양관리까지를 포함한 종합적인 수산자원 조성사업을 확대하여 가고 있다. 그러나 해양 목장화 사업에는 왕복성 어류나 담수 어류는 포함되지 않고, 뱀장어의 경우는 치어 방류 사업의 일부에 포함되어 강원도, 경기도, 충청도 등에서 뱀장어 방류 사업을 수행하였다.

왕복성 어류와 어도

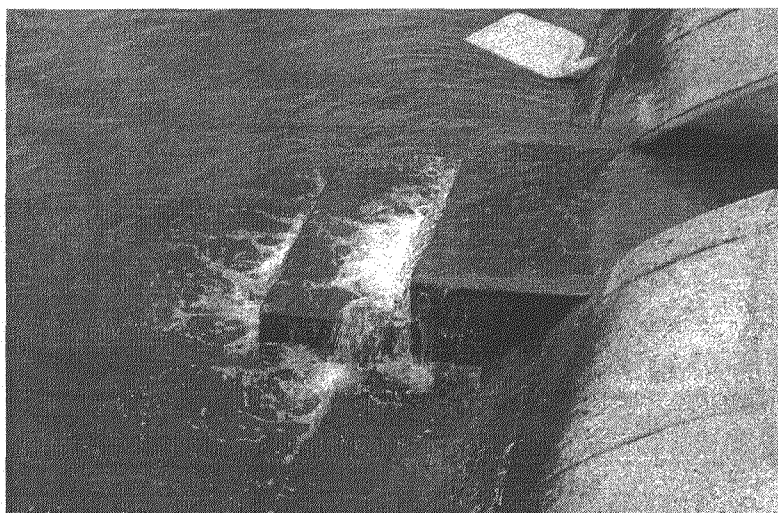
왕복성 어류의 경우 자원 조성에 가장 중요한 것은 어류의 이동을 원활히 하는 어도 사업이다. 어도(魚道)는 말 그대로 어류가 다니는 길로 하천에 보를 설치하여 어류의 이동이 차단될 때, 보의 일부에 통로를 만들어 어류가 이동할 수 있도록 통로를 만드는 것이다. 근래에 국내 강하구에 대규모 하구둑과 하천에는 많은 보가 건설되면서 민물과 바다 사이를 이동하는 왕복성 어류(diadromous fish)와 양측성 어류(amphidromous fish) (이하 왕복성 어류로 함)의 이동 통로가 막히게 되었다. 왕복성 어류의 이동을 원활하게 하기 위해서 수산자원 보호령에 어도 설치가 의무화되어 있어 하구나 하천에 보를 막을 때는 어도를 설치

하고 있으나, 사업 허가를 위해서 형식적으로 설치하고 사후 관리가 제대로 되지 않아 그 효과가 크지 않은 경우가 많다.

국내에는 한일합방 이후 어도 설치를 하여 내수면에는 많은 어도가 설치되었다. 1971년 수산자원 보호령 12조 2항 어도 설치 조항이 신설되었고, 1976년 7월 수산자원 보호령 12조 3항으로 개정되었으며, 1996년 12월 수산자원 보호령 2조 2항으로 개정되어 어도 설치를 명문화하였다. 1980년 이후 대규모 하구둑이 건설되면서 본격적으로 울진 왕피천 어도(1985년), 금강 하구둑 어도(1987년), 낙동강 하구둑 어도(1987년) 등이 설치되었다. 그러나, 하구 어도들은 국내 하구의 특성(조석, 하천 유량 등) 및 어도를 이용할 수 있는 생물들의 생태를 고려하지 않은 상태에서 건설하였다. 농업진흥공사에서는 1986년부터 여러 연구기관에 연구비를 지급하여 어도에 대한 어도 이용, 서식 공간 조성 및 모형 개발의 연구를 수행하였고 국내 어도에 대한 전반적인 현황 조사 뿐 아니라 각 어도에서 수개월에서 수년간 직접 어류를 채집하여 어도 이용 가능한 어류의 종조성 등을 밝히는 등 체계적이고 종합적인 어도 연구를 수행하였다. 그러나 이 연구에서는 어도나 그 인접 수역에서 어류를 채집하여 그 종조성의 계절 변화만을 밝혔을 뿐 각 어종에 대한 구체적인 생태는 밝히지 못하였다. 근래에 농업기반공사에서는 갑문식 어도를 개발하여 하구에 시공하여 일부 효과를 보고 있다.

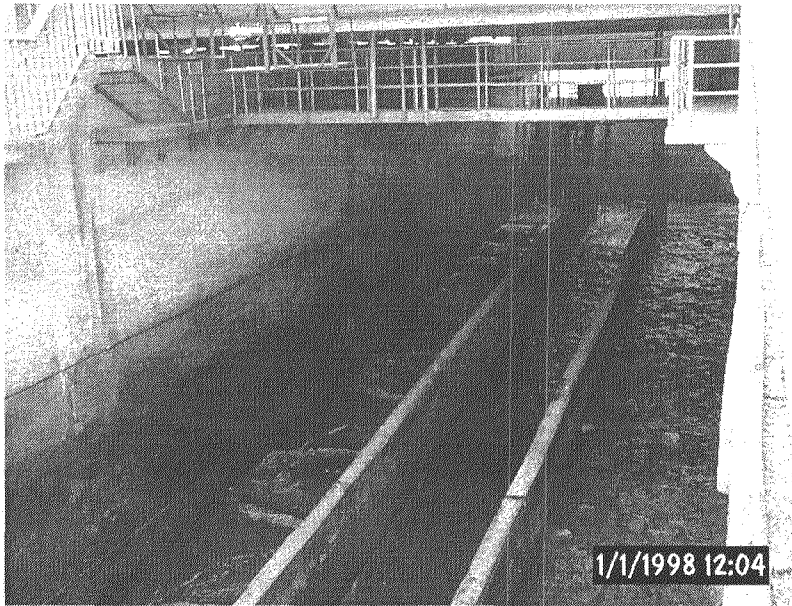
국외에서 어도는 연어를 대상으로 시작되어 유영력이 뛰어난 어류를 대상으로 설치되었고, 국내 하천의 어도도 외국의 사례를 참고하여 유영력이 강한 어류를 대상으로 대부분 설계 설치되었다. 계단식 어도는 중간에 쉴 수 있는 공간을 만들어 어류들이 수로를 통과할 수 있도록 설계되어 있으나, 유영력이 약한 어류는 계단을 뛰어 오를 수 없다.

서남 연안의 하구둑은 조차가 큰 하구에 위치하여 내외수면 차이가 크고, 수산 경제적으로 중요한 어종은 뱀장어, 은어와 같은 유어와 참게 유생 등이다. 금강하구둑의 경우 일본(Sanyoo 용역단)의 자문을 받았고 네델란드 NEDECO사에서 설계 시공되어, 세 부분으로 나누어 계단식, 경사식 및 간 자갈을 깔 경사식으로 건설되어 외형상으로 완벽해 보인다. 금강의 경우 왕복성 어류는 뱀장어, 송어, 웅어 등이 많고, 참게도 주요한 수산생물이다. 어도에는 실제로 많은 송어가 오르는 것을 관찰할 수 있다. 그러나 하구둑의 내부 호수는 완전 민물로 기수성인 송어가 민물에서 성장할 수 있는지는 의문이다. 어도가 건설된 이후



계단식 어도 (제주 천제연 하구)

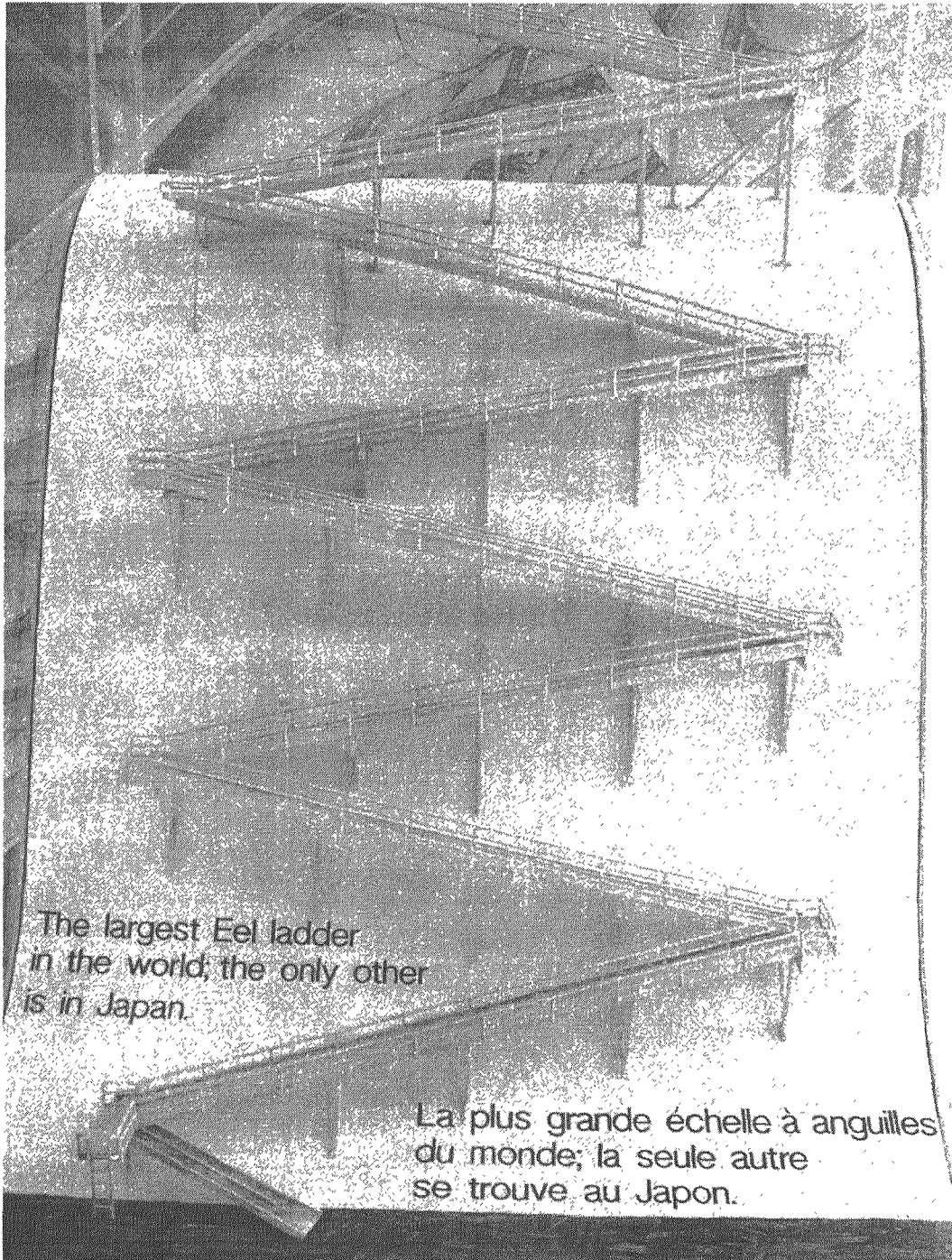
어도를 리용하는 어류에 대한 구체적인 조사가 되지 않지만 크기가 작은 실뱀장어나 어린 참게들이 유속이 강한 이 어도를 오르기는 힘들어 보인다.



금강하구어도

구미의 뱀장어 어도

유럽, 북미 하구에서 뱀장어는 자원량이 많아 생태적으로 중요하고, 수산경제적으로도 중요한 어류였다. 이곳에서는 1970년대부터 유영력이 약한 뱀장어와 같은 종을 대상으로 생태를 고려한 특수 뱀장어 어도를 시설하고 그 효과에 대한 연구가 수행되고 있다. 한 예로 2003년 8월 필자는 북미의 오대호와 대서양을 연결하는 세인트 로렌스 강의 사운더스(Sounders) 수력발전소 댐의 뱀장어 어도를 방문하였다. 이 어도는 길이가 800 m 에 이르며 어도를 따라 사람이 다닐 수 있는 통로가 있어 일반인도 안내인을 따라 방문할 수 있다. 어도가 설치된 자리는 원래 겨울에 댐 상부에 어는 얼음을 하류로 내려 보내려고 만든 경사면이었으나, 얼음이 거의 얼지 않아 20여년전 뱀장어 어도를 건설하였다. 이 어도는 경사가 완만하며, 어도에는 플라스틱으로 만든 나무 잎줄기를 쌓아 놓아 뱀장어가 오르기 쉽게 설계되었다. 그동안 조사한 결과에 의하면 많이 오를 때에는 하루에 50,000 마리까지 오르는 것이 관찰되었고, 이 어도를 오르는데 걸리는 시간은 50 cm 이상의 큰 뱀장어는 하루 정도, 20 cm 이하의 작은 뱀장어는 3일 정도 걸리는 것이 관찰되었다고 한다. 사운더스 댐은 캐나다와 미국의 국경인 세인트 로렌스 강에 위치하여 두 나라가 공동으로 관리하며, 현재 뱀장어 어도는 캐나다 쪽에만 설치되어 있는데, 미국 쪽에서도 건설 중으로 곧 완공될 것이라고 하였다.

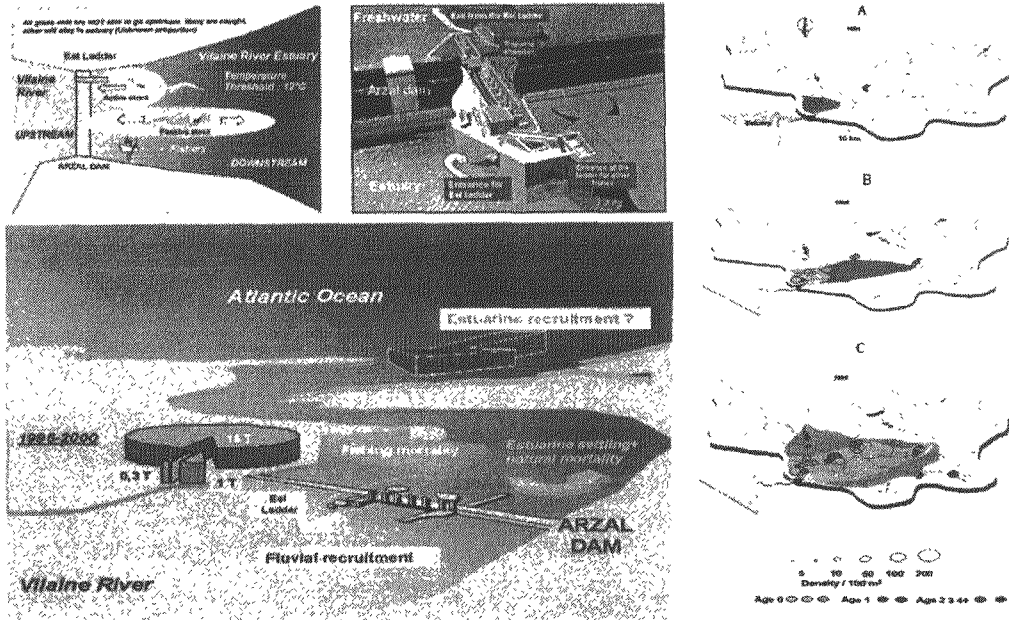


사운더스 댐의 뱀장어 어도 모형도



사운더스 댐 뱀장어 어도의 구조

유럽의 강과 하구에는 뱀장어 자원량이 많고 대부분의 유럽국가에서 뱀장어를 식용하여 뱀장어 연구의 역사가 길고 뱀장어에 대한 관심도 많다. 이미 20세기 초 20여년에 걸쳐 대서양 전역에서 뱀장어 치어를 수집하여 유럽 뱀장어의 산란장이 유럽에서 6,000 km나 떨어진 북대서양 서부의 사르가소해임을 밝혔고, 이미 1970년대에 유럽 뱀장어 자원 위원회를 결성하여 격년으로 뱀장어 관련학자들이 모여 자원 보전을 위하여 많은 노력을 기울여 오고 있다. 한 예로 프랑스에서는 일반 어도가 뱀장어에 적합하지 않음을 인식하고 일반 어도에 추가로 뱀장어 어도를 만들어 그 효과에 대하여 검증하였다. 하구에 독을 만든 후 뱀장어 자원이 크게 감소하였으나, 하구독에 뱀장어 어도를 추가로 만든 후 시간이 자남에 따라 하구독 내부 호수 및 하천에 뱀장어 자원량이 크게 증가하는 것이 입증되었다.



프랑스의 일반 어도에 추가된 뱀장어 어도모형과 뱀장어 어도 설치 후 뱀장어 자원량 증가와 분포 지역의 확대

뱀장어 자원 관리의 방향

국내 하천의 수질이 악화되었고 하구에는 많은 하구둑이 건설되어 뱀장어가 살 수 있는 공간이 크게 감소하여 뱀장어 자원량이 크게 감소하였을 것으로 예상된다. 그러나 뱀장어 자원량 변동에 대한 구체적인 연구는 아직 미비한 상태이다. 앞에서 언급한대로 일부 지자체에서 어린 뱀장어 방류 사업을 하여 자원 보전에 대한 상징적 의미는 있으나 뱀장어 전체 서식처에 대하여 방류량은 그 양이 미미하여 그 효과는 크지 않을 것으로 보인다.

하구둑이 건설되며 내부의 담수 호수는 원래의 하천보다 뱀장어 서식 공간이 넓어진 것으로 볼 수 있다. 이 빈 서식 공간에 뱀장어 자원이 육성된다면 하구둑을 만들기 이전 보다 자원량을 늘릴 수 있을 것이다. 서남해 하구의 왕복성 어류 가운데 뱀장어는 가장 경제적 가치가 높은 종이다. 실제로 자연산 뱀장어의 값은 kg에 10만원 이상으로 양식산 뱀장어 가격 10,000~13,000원의 거의 10 배 정도이다. 뱀장어 자원이 제대로 육성된다면 어민 소득에도 크게 기여할 것으로 판단된다.

하구둑으로 막힌 내부의 담수 호수와 하천에 뱀장어 자원 육성을 할 수 있는 가장 좋은 방법은 뱀장어가 효과적으로 어도를 오르게 하는 방법을 들 수 있다. 그러나 기존의 대부분 어도는 유영력이 강한 어류를 대상으로 건설되어 뱀장어가 제대로 어도를 이용할 수 있는지 의문시된다. 따라서 앞에서 살펴 본 것과 같이 북미나 유럽의 하천에서와 같이 현재의 하구둑이나 하천 보의 어도를 일부 변형아형 뱀장어 용 어도를 추가로 건설한다면 뱀장어 자원을 크게 늘려 하천의 종다양성도 보

전하고, 지역 경제에도 크게 이익이 될 것을 판단된다. 이를 위해서는 하구에서 뱀장어 생태를 구명하고 국내 하구에 맞는 뱀장어 어도를 설계 시공한 후 그 효과를 검증하는 연구 개발이 절실하다.

참고문헌

- 김을배. 1974. 제주도산 실뱀장어의 소상 동태에 관한 연구: 특히 환경요인과의 관계를 중심으로. 한국육수학회지, 7:1-22.
- 문형태, 김광천, 김완수, 이태원. 2001. 실뱀장어 어획량의 연변동과 수온 적응 범위. 추계 한국 해양학회 학술발표회 초록집. 11월 2-3일, 한국해양연구소.
- 손상규 외 6인. 2000. 유럽산 및 북미산 뱀장어 양식기술 개발에 관한 연구. 해양수산개발원 수특과제 연구보고서, 113p.
- 문형태. 2002. 실뱀장어 이석의 미세구조와 어획 자료를 이용한 뱀장어 *Anguilla japonica*의 초기 생활사. 충남대학교 대학원 박사학위논문. 111p.
- 이태원, 문형태, 김광천, 황선도. 2001. 염색 표지 방류 방법을 이용한 제주 천제연 하구 실뱀장어 자원량 추정. 2001년 춘계 한국수산고등학교 발표 초록, 국립수산진흥원. 2001년 5월
- 전승관, 주광현, 주태근. 1971. 뱀장어 양식시험. 국립수산진흥원 사업보고 (담수양식):7-36.
- Aida, K. and K. Tsukamoto (eds). 1999. 'Life Cycle of Japanese eel' Kaiyo Monthly, 18. 188p.
- Aida, K., K. Tsukamoto and Y. Ymauchi (eds). 2003. Eel Biology. Springer, Tokyo. 497p.
- Boetius J, Harding EF. 1985. A re-examination of Johannes Schmidt's Atlantic eel investigations. Dana 4:129-162
- Campana, S. E. and Neilson, J. D. 1985. Microstructure of fish otoliths. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 42, 1014-1032.
- Cheng, P. W. and W. N. Tzeng. 1996: Timing of metamorphosis and estuarine arrival across the dispersal range of the Japanese eel *Anguilla japonica*, Mr. Ecol. Prog. Ser. 131: 87-96.
- Deelder, C. L. 1970. Synopsis of Biological Data on the Eel, *Anguilla anguilla*. FAO Fish. Syn. 80. unpagued.
- Desaunay, Y. and D. Guerault, 1997. Seasonal and long-term changes in biometrics of eel larvae: a possible relationship between recruitment variation and North Atlantic ecosystem productivity. J. Fish. Biol., 51 (Supplement A): 317-339.
- Fricke, H. and K. Tsukamoto, 1998. Seamounts and mystery of eel spawning. Naturwissenschaften 85: 290-291.
- Inoue, T. and S. Kimura. 1999. Migration mechanism of the glass eel-2. Fluctuation factors on the glass eel transportation. *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.
- Jellyman, D.J., 1977. Invasion of New Zealand freshwater stream by glass-eels of two *Anguilla* spp.. N. Z. J. Mar. Fresh. Res., 11(2): 193–209.
- Jones, C., 1986. Within-season differences in growth of larval Atlantic herring, *Clupea harengus harengus*. Fish. Bull. 83(4): 289–298
- Kajihara T. 1988. Distribution of *Anguilla japonica* leptocephali in the Western Pacific during September 1986. Nippon Suisan Gakk 54:929–933
- Kim W. S., J. M. Kim., S. K. Yi and H. T. Huh. 1997. Endogenous circadian rhythm in the rate of oxygen consumption of the river puffer fish, *Takifuku obscurus*. Mar. Ecol Prog. Ser. 153: 293–298.
- Kim, W. S., Seong Jin Yoon, Hyung Tae Moon, Tae Won Lee. 2002. Effects of water temperature changes on the endogenous and exogenous rhythms of oxygen consumption in glass eels *Anguilla japonica*. Mar. Ecol. Pr. Ser. 243: 209–216
- Kimura, S., K. Tsukamoto and T. Sugimoto. 1994. A model for the larval migration of the Japanese eel: roles of the trade winds and salinity front. Mar. Bio. 119: 185–190.
- Lee, T W. & Lee, K. S. 1989. Daily growth increments and lunar pattern in otoliths of eel, *Anguilla japonica* in the freshwater. Bull. Korean Fish. Soc. 22: 36–40.
- Lee, T. W. and Byun, J. S. 1996. Microstructural growth in otoliths of conger eel (*Conger myriaster*) leptocephali during the metamorphic stage. Mar. Biol. 125, 259–268.
- Lee, T. W. and G. C. Kim. 2000. Microstructural growth in otoliths of black rockfish (*Sebastes schlegelii*) from prenatal larval to early juvenile stages. Ichthyol. Res. 47: (in press)
- Lee, T. W. and W. S. Kim. 2001. Thermal effect on respiratory activities of glass eels at the different developmental stages. J. Taiwan Fish. Res. 9: 129–136
- Lee, T. W., H. Fricke and K. Tsukamoto. 2001. Spawning area and time of *Anguilla japonica*. pp 21–23 *in* K. Aida et al. (ed). Proceedings of the International Symposium on Advances in Eel Biology. Univ. of Tokyo. Sept. 28–30, 2001.
- Lee, T. W., H. T. Moon, S. D. Hwang and W. S. Kim. 2001. Fluctuation of elver catch of Japanese eel (*Anguilla japonica*) in Korea water. *In* Proceedings of 10th Annual Meeting of PISCES. Victoria B. C. Canada, October 5–13, 2001.
- Lee, T. W., S. D. Hwang, W. S. Kim and C. W. Park. 2001. Optimal temperature range of glass eels. pp 180–182 *in* K. Aida et al. (ed). Proceedings of the

- International Symposium on Advances in Eel Biology. Univ. of Tokyo. Sept. 28–30, 2001.
- Matsui, I. 1957 On the records of a leptocephalus and catadromous eels of *Anguilla japonica* in the waters around Japan with the presumption of their spawning places. J. Shimonoseki Coll. Fish. 7: 151–167.
- McCleave, J.D., R.C. Kleckner & M. Castonguay. 1987. Reproductive sympatry of American and European eels and implications for migration and taxonomy. pp. 286–297. M.J. Dadswell, R.J. Klauda, C.M. Moffitt, R.L. Saunders, R.A. Rulifson & J.E. Cooper (ed.) Common Strategies of Anadromous and Catadromous Fishes, Proceedings of an International Symposium, American Fisheries Society, Bethesda.
- Michaud, M., J.D. Dutil and J.J. Dodson, 1988. Determination of the age of young American eels, *Anguilla rostrata*, in fresh water, based on otolith surface area and microstructure. J. Fish Biol., 32: 179–189.
- Ozawa, T., Tabeta, O. and N. Mochioka, 1989. Anguillid leptocephali from the western north Pacific east of Luzon in 1988. Bull. Jap. Soc. Sci. Fish. 55:627–632.
- Pannella, G. 1971. Fish otoliths: daily growth layers and periodical patterns. Science (Wash., DC). 173:1124–1127
- Schmidt, J., 1922. The breeding places of the eel. Phil. Trans. Roy. Soc. Lond., B. 211:179–208.
- Schoth M, Tesch FW. 1982. Spatial distribution of 0-group eel larvae (*Anguilla* sp.) in the Sargasso Sea. Helgol nder Meeresunters 35:309–320
- Shojima, Y., 1966. Report on a capture of an elver of Japanese eel, *Anguilla japonica* Temminck et Schlegel, in the East China Sea. Nippon Suisan Gakkaishi 32, 41–44.
- Shojima, Y., 1967. Record of Japanese eel elver found in the offshore of the East China Sea for the second time. Zool. Mgmt. 76:167–171.
- Shojima, Y., 1989. The Japanese eel elver collected offshore in the East China Sea by Seikai Regional Fisheries Laboratory. In Abstracts of the Annual Meeting 1988 of Kyushu Branch, Japanese Society of Scientific Fisheries, pp. 3. Fukuoka: Kyushu Branch of Japanese Society of Scientific Fisheries.
- Tabeta O, Konishi Y. 1986. An anguillid leptocephalus *Anguilla japonica* from the waters south of Miyako Island, Okinawa, Japan. Bull Japan Soc Sci Fish 52:1935–1937
- Tabeta, O. and T. Takai, 1973. An elver *Anguilla japonica* found in the northern part of the South China Sea. J. Shimonoseki Univ. Fish. 22:1–5.
- Tabeta O, Takai T. 1975. Leptocephalus of *Anguilla japonica* found in the waters south of Taiwan. Japan J Ichthyol 22:100–103

- Tabeta, O., Tanaka, K., Tamada, J., Tzen, W. N. 1987. Aspects of the early life history of the Japanese eel *Anguilla japonica* determined from otolith microstructure. Nippon Suisan Gakk. 55: 1717–1734
- Tanaka S. 1975. Collection of leptocephali of the Japanese eel in waters south of the Okinawa Island. Bull Japan Soc Sci Fish 41:129–136
- 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, 2001.
- Tesch, F.-W., Kracht, R., Schoth, M., Smith, D. G. and Wegner, G., 1979. Report on the eel expedition of F. R. V. "Anton Dohrn" and R. K. "Friedrich Heincke" to the Sargasso Sea 1979. ICES, C. M. 1979 M6.
- Tsukamoto, K. 1990. Recruitment mechanism of the eel, *Anguilla japonica*, to the Japanese coast. J. Fish Biol. 36:659–671.
- Tsukamoto K. 1992. Discovery of the spawning area for Japanese eel. Nature 356:789–791
- Tsukamoto, K., I. Nakai and W. V. Tesch. 1998. Do all freshwater eels migrate? Nature 396. p.636
- 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 influences. Bull. Jap. Soc. Fish. Oceanogr. 47: 11–28.
- Tzeng WN. 1990. Relationship between growth rate and age at recruitment of *Anguilla japonica* elvers in a Taiwan estuary as inferred from otolith growth increments. Mar Biol 107:75–81
- Tzeng WN, Tsai YC. 1992. Otolith microstructure and daily age of *Anguilla japonica* Temminck & Schlegel elvers from the estuaries of Taiwan with reference to unit stock and larval migration. J Fish Biol 40:845–857
- Umezawa, A., Tsukamoto, K. 1990. Age and birth date of the glass eel, *Anguilla japonica*, collected in Taiwan. Nippon Suisan Gakk. 56: 1199–1202
- Umezawa, A. Tsukamoto, K., Tabeta O. & Yamada, H. 1989. Daily growth increments in the larval otolith of the Japanese eel, *Anguilla japonica*, J. Ichthyol. 35, 440–444.
- Wippelhauser, G. S., J. D. McCleave and R. C. Kleckner, 1985. *Anguilla rostrata* leptocephali in the Sargosso Sea during February and March 1981. Dana 4:93–98.
- 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.

연구 자료 제공 및 수집에 협조하신 분

성 명	소 속 및 직 위	역 할	비 고
김 재 형	양만수산업협동조합장	실뱀장어 채포량 자료 제공	
유 역	양만수산업협동조합 고문	“	
한 경 민	부경대학교	자료 수집 협조	
좌 종 현	제주대학교 해양학과	“	
이 승 종	“	“	
김 영 남	서귀포 실뱀장어 수집상	실뱀장어 채포량 자료 제공	
박 규 현	낙동강 실뱀장어 수집상	“	
홍 종 근	“	“	
이 동 만	서 해 실뱀장어 수집상	“	
이 원 용	압해도 실뱀장어 수집상	“	
유 상 기	금강 실뱀장어 수집상	“	
서 진 영	금강 실뱀장어 채포업자	실뱀장어 자료 수집	
이 윤 호	만경강 실뱀장어 채포업자	“	
박 종 협	제주 천제연 하구 채포업자	“	
김 민 호	“	“	
	영광 실뱀장어 수집상		
N. Mochioka	Kyushu 대학교 조교수	일본 실뱀장어 자료 제공	일본
J. Aoyama	동경대 해양연구소 연구원	산란장 뱀장어 자료	일본