

실험 어도에서 실뱀장어의 소상 행동

황선도 · 이태원^{1,*} · 황학빈¹ · 최일수² · 황선재³

국립수산과학원 서해수산연구소, ¹충남대학교 해양학과, ²전남대학교 응용수학과, ³국립수산과학원 자원연구과

Upstream Behavior of Glass Eels (*Anguilla japonica*) in an Experimental Eel-ladder by Sun-Do Hwang, Tae Won Lee^{1,*}, Hak-Bin Hwang¹, Il-Su Choi² and Sun Jae Hwang³ (West Sea Fisheries Research Institute, National Fisheries Research and Development Institute, Incheon 400-420, Korea; ¹Department of Oceanography, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea; ²Department of Applied Mathematics, Chonnam National University, Yeosu 540-749, Korea; ³Fisheries Resources Research Division, National Fisheries Research and Development Institute, Busan 619-902, Korea)

ABSTRACT Upstream behavior of glass eels was examined in an experimental eel-ladder at a laboratory of the National Fisheries Research and Development Institute from March to May in 2008. The study was made under various environmental factors and conditions affecting the upstream migration of glass eels in order to design a functional ladder that would allow the passage of glass eels. The experimental eel-ladder consisted of an upper freshwater chamber and a lower sea water chamber; glass eels in sea water can move up to the upper freshwater chamber through the slope (eel-ladder) between them. The optimal condition of the eel-ladder was estimated by comparing the number of glass eels that moved upstream depending on various conditions. Since the glass eels actively moved up the slope to river water rather than to reservoir water or tap water, the experiment was realized using river water. A significantly higher number of glass eels moved up during the spring tide than during the neap tide, and during night than during the day. Upstream movement was significantly higher during high tide than during low tide. Glass eels effectively moved up through a slope of less than 30° and water-flow velocity lower than 0.4 m/sec. The fish preferred a coarser ladder bed covered with small gravels, brush or carpet.

Key words : Glass eel, *Anguilla japonica*, upstream migration, eel-ladder

서 론

뱀장어 속 어류 (Genus *Anguilla*)는 강이나 하구에서 성장하여 성숙한 뱀장어는 바다로 회유하여 산란하는 강하성 어류 (catadromous fish)로, 전 세계에 19종이 알려져 있다 (Watanabe *et al.*, 2004, 2009). 그 가운데 온대에 분포하는 뱀장어는 강과 하구에서 생물량이 많고, 수산 경제적으로도 중요한 위치를 차지하고 있다. 특히 우리나라를 비롯한 일본, 중국 및 대만에 분포하는 동아시아산 뱀장어 *Anguilla japonica*는 동아시아에서 주요 양식 어종이다. 뱀장어는 실험실에서 인공 부화 및 치어 생산이 가능하지만 아직 대량

종묘생산이 되지 않기 때문에 (Yamamoto and Yamauchi, 1974; Yamauchi *et al.*, 1976; Tanaka, 1999, 2001; Tanaka *et al.*, 2001; Kim *et al.*, 2007), 뱀장어 양식장에서는 하구에서 자연산 실뱀장어를 잡아 종묘로 이용하고 있다. 이러한 수산 경제적 중요성 때문에 실뱀장어의 생태에 대하여 많은 연구가 수행되었다 (Deelder, 1970; Aida *et al.*, 2003; Tesch, 2003). 근래 온대에 분포하는 뱀장어는 동아시아 뱀장어 *A. japonica* 뿐 아니라 유럽산 뱀장어 *A. anguilla*와 아메리카산 뱀장어 *A. rostrata*의 자원량이 1970년대에 비하여 90% 이상 감소한 심각한 상태이며 (Dekker, 2003), 그 원인으로 전 지구적 기후 변동에 따른 대양의 해류 변화로 인한 성어 및 치어의 회유 영향, 남획, 강과 하구의 오염 및 하구둑 건설로 인한 뱀장어 소상 통로 차단 등이 제시되었다.

*교신저자: 이태원 Tel: 82-42-821-6433, Fax: 82-42-822-8173,
E-mail: twlee@cnu.ac.kr

우리나라 및 동아시아에 분포하는 *A. japonica*는 마리아나 해산(Mariana ridge) 근해에서 산란하며(Tsukamoto *et al.*, 2003, Chow *et al.*, 2009), 부화된 뱀장어(leptocephalus)는 북적도 해류와 쿠로시오 해류를 따라 회유한다. 뱀장어는 동중국해 대륙사면에 이르기 전 실뱀장어(glass eels)로 변태한 후 대륙붕을 회유하여 하구를 통해 성육장인 강으로 소상한다. 동아시아산 실뱀장어는 대만 및 일본 남부 도서에는 12월부터(Tzeng, 1985; Tsukamoto, 1990; Cheng and Tzeng, 1996), 제주도 및 양쯔강 하구는 1월부터, 우리나라 남해안에는 2월 중순부터, 서해 연안에는 2월 하순부터 소상하여 주로 약 3~4달간 소상한다(전 등, 1971; 김, 1974; 문, 2002). 그러나 최근 실뱀장어의 소상량이 감소되고, 수입도 한계가 있어 종묘공급이 원활하지 못한 실정이다.

국내 하구와 하천에는 홍수조절 및 농공업 용수를 이용하기 위해서 많은 댐과 보가 건설되었다. 국내 하천의 보와 하구의 독에 설치된 어도는 어도를 이용할 생물의 생태와 행동을 고려하지 않고 설치한 경우가 대부분이고 어도 설치 후 관리를 하지 않아 어도가 제 기능을 하지 못하는 경우가 많다(황, 2000, 2003). 서남 연안 하구는 조차가 커서 내외 수면 차이가 크고, 경사식 혹은 계단식 어도들 조차 물의 흐름이 강하여 유영력이 약한 유어나 기어오르는 습성을 가진 갑각류와 같은 수서동물들은 소상이 어렵게 되어 있어, 이들 수서동물의 생태와 행동에 적합한 어도가 설치되어야 어도가 제구실을 할 수 있을 것으로 판단된다(황, 2000, 2003; 양 등, 2001).

캐나다, 미국 및 프랑스 등지에서는 어도를 이용하는 어종의 생태와 습성을 고려한 생태 어도를 시설하고 있다. 미국과 캐나다 사이를 흐르는 St. Lawrence 강의 Saunders 수력발전소 댐에는 캐나다 쪽에서 1980년대 뱀장어 어도를 건설하여 소상하는 뱀장어를 장기간 모니터링하고 있다. 이

댐의 미국 쪽에도 막대한 예산을 투입하여 근래에 뱀장어 어도가 완공되었다(see <http://www.nypa.gov/press/2005/050902bpr.htm>). 특히, 프랑스의 Vilaine 강 하구에서는 유영력이 큰 어류를 위한 일반 어도 옆에 뱀장어 어도를 추가로 설치하였고, 이 어도 설치 후 뱀장어 생물량이 크게 증가하는 것이 관찰되었다(Liew, 1982; Fontenelle *et al.*, 2001; Briand *et al.*, 2005; see <http://www.fish-pass.fr>). 그러나, 아직 국내에서는 뱀장어용 생태 어도에 대한 연구는 미미한 실정이다.

금강 실뱀장어 일일 어획량은 조차와 월령에 따라 변하며, 수온, 염분, 풍속 및 날씨의 변화에 영향을 받았다(이, 2003). 이 소상 생태 자료를 이용하여 하구독의 수문을 조절하면 실뱀장어 소상을 도울 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 하구독 어도는 실뱀장어의 습성을 고려하여 어도를 개선하면 보다 많은 실뱀장어들이 소상할 수 있을 것으로 기대된다. 하구에서 실뱀장어 어획량에 영향을 미치는 요인을 근거로 실험실의 모형어도에서 소상 행동을 관찰·분석함으로써 실뱀장어들이 원활하게 소상할 수 있는 어도를 제작할 수 있을 것이다.

본 연구는 실뱀장어 소상에 적합한 어도를 설계하기 위해서 모형어도를 제작하여 다양한 하구 환경 조건 하에서 어도의 경사, 유속 및 바닥 재질에 따른 실뱀장어 소상 행동을 관찰·분석하였다.

재료 및 방법

어도에서 실뱀장어의 소상 행동을 조사하기 위해서 2008년 3~5월에 국립수산과학원 수산공학동 어군행동실험실에 실뱀장어가 소상하는 하구독과 어도를 재현하는 모형하구를 제작, 설치하였다(Fig. 1). 수조는 전체 길이 200 cm,

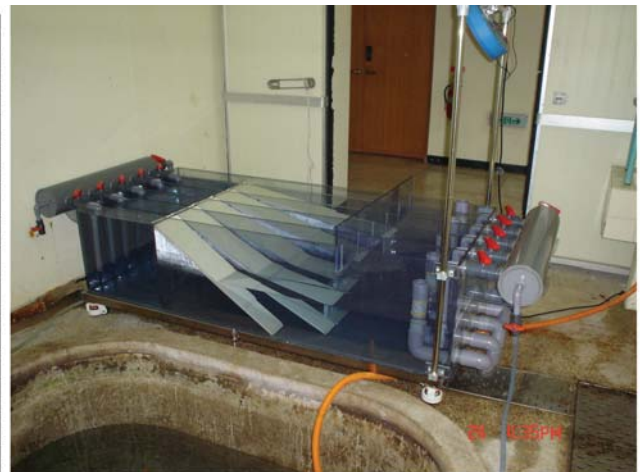
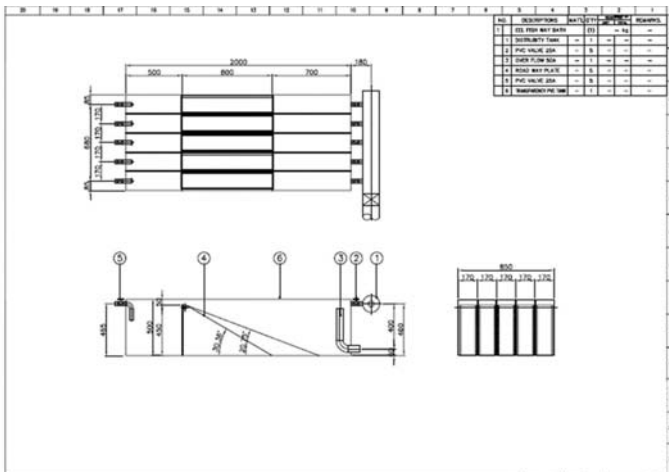


Fig. 1. Fish ladder used for the experiment: design drawing (left) and overview of glass eel-ladder (right).

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

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

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

Experimental conditions	Initial condition (number of ind.)	Taming condition	Survival rate in 18 ~ 24 hrs
Change of salinity	20 psu, 14.0°C (n=100)	35 psu, 13.6°C	54%
Change of salinity	33 psu, 14.5°C (n=50)	22 psu, 14.5°C	100%
Change of water temperature	22 psu, 22.0°C (n=200)	22 psu, 16.7°C	63%

높이 50 cm, 폭 85 cm이며, 어도의 상부 50 cm의 ‘담수조’에서 150 cm의 ‘해수조’로 물이 흐르게 하였다. 상부 담수조와 하부 해수조 사이에는 폭 17 cm 간격으로 다섯으로 칸을 나누어 어도경사면의 기울기와 길이 등을 독립적으로 조정할 수 있도록 하였으며, 해수조의 수위를 조정할 수 있도록 제작하였다. 해수조에는 하단에 해수가 들어오고, 담수와 섞인 기수는 상단으로 빠져나가도록 통로를 만들어 하구의 상황을 재현하였다. 해수는 바다에서 실험실로 직접 연결된 입수관을 통해 공급하였으며, 담수는 현장에서 운반하여 대형 수조에 담아 공급하였다.

염분 변화에 따른 순치 실험을 위해 낙동강 하구(20.00 psu, 5.0°C)에 채집한 실뱀장어를 부산시 기장군 앞바다의 해수(35.00 psu, 3.6°C)에 넣고 일정시간 경과 후, 염분을 높

였을 때 실뱀장어 생존율을 비교하였다. 또한, 기장군 죽성포구의 해수(33.30 psu, 14.5°C)에서 채집된 실뱀장어를 기수(22.20 psu, 14.5°C)에서 일정시간 경과 후, 염분을 낮추었을 때 실뱀장어 생존율을 비교하였다. 온도 변화에 따른 순치 여부를 파악하기 위해 22°C 기수와 16.7°C 기수에서 일정시간 경과 후, 실뱀장어 생존율을 비교하였다. 주광성 여부를 파악하기 위해 불빛에 대한 반응과 주야 활동성을 관찰하였다.

최적 소상 어도 조건을 추정하기 위한 실험에 이용된 실뱀장어는 낙동강 하구에서 채집하여 실험 전 충분히 실험실 수조에서 적응시켰으며, 낙동강 물은 하구둑 위의 물을 사용하였다. 해수조에 실뱀장어를 두고 담수조의 담수를 해수조로 흐르게 하며 월령, 낮과 밤, 조석주기, 어도 경사도와

경사면길이, 바닥 재질, 유속, 담수 종류 등에 따라 소상하는 실뱀장어의 개체수를 계수하였다(Table 1). 실험 실뱀장어는 1회에 50마리씩 사용하였으며, 실험 후 실뱀장어는 채집된 하구에 방류하였다. 실험시간은 1시간으로 대조 때 종료하는 것을 기준으로 하였으며, 모든 실험에서 3회 반복 실험하였다.

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

cm, 경사도 30°, 유속 0.4 m/sec의 조건에서 적정 재질을 구하는 실험을 수행하였다.

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

결 과

1. 순치 실험

낙동강 하구(20 psu, 14.0°C)에서 채집된 실뱀장어를 염

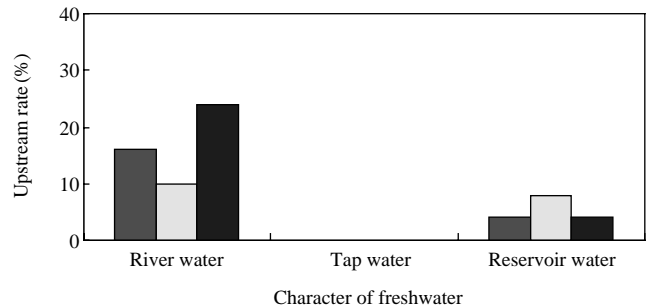


Fig. 2. Variation in upstream rate of glass eels according to character of fresh water (river water, tap water and reservoir water). Each vertical bar indicates three replicated attempts.

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

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

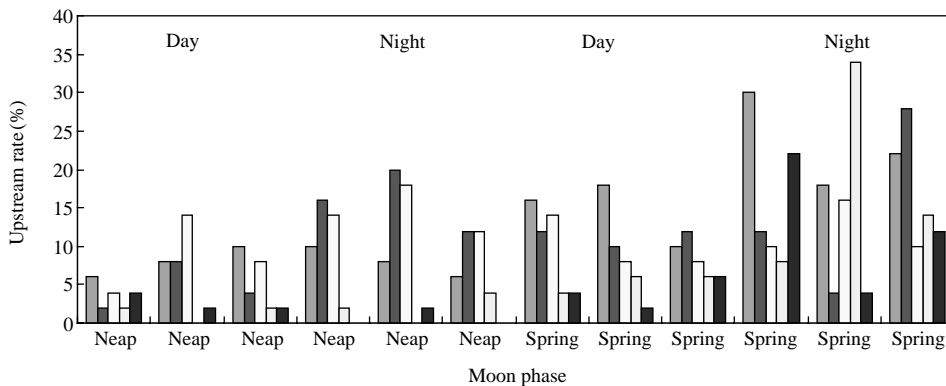


Fig. 3. Variation in upstream rate of glass eels according to the ladder gradients(10°, 20°, 30°, 40° and 50° from the left to the right) during the neap and spring tides.

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

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

Character of water								
River water			Tap water			Reservoir water		
N	MEAN	STD	N	MEAN	STD	N	MEAN	STD
3	8.33	3.51	3	0.00	0.00	3	2.67	1.15
Source	DF	SS	MS	F	Pr>F			
Character of water	2	108.67	54.33	11.93	0.0081			
Error	6	27.33	4.56					
Duncan grouping	Mean	N	Character of water					
A	8.333	3	River					
B	2.667	3	Reservoir					
B	0.000	3	Tap					

Means with the same letter are not significantly different.

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

Tide																	
Tide 1			Tide 2			Tide 3			Tide 4			Tide 5			Tide 6		
N	MEAN	STD	N	MEAN	STD	N	MEAN	STD	N	MEAN	STD	N	MEAN	STD	N	MEAN	STD
5	9.40	8.11	5	6.40	7.02	5	5.20	4.15	5	5.20	4.08	5	5.54	4.39	5	10.40	7.83
Source	DF	SS	MS	F	Pr>F												
Tide	5	133.60	26.72	0.70	0.6300												
Error	24	918.40	38.27														
Duncan grouping	Mean	N	Tide														
A	10.400	5	Tide 6														
A	9.400	5	Tide 1														
A	6.400	5	Tide 2														
A	5.400	5	Tide 5														
A	5.200	5	Tide 3														
A	5.200	5	Tide 4														

Tidal level								
High			Middle			Low		
N	MEAN	STD	N	MEAN	STD	N	MEAN	STD
6	15.00	4.73	6	8.83	5.42	6	7.67	2.94
Source	DF	SS	MS	F	Pr>F			
Time	2	186.30	93.17	4.62	0.0272			
Error	15	302.17	20.14					
Duncan grouping	Mean	N	Tidal level					
A	15	6	High					
B	8.833	6	Middle					
B	7.667	6	Low					

Means with the same letter are not significantly different.

2. 주광성 실험

랜턴 불빛을 비추었을 때 불빛을 피하였고, 낮에는 은폐 물에 숨어 있었으며 밤에는 왕성한 활동이 관찰되었다 (Table 3).

3. 소상 요인 실험

1) 담수의 종류에 따른 소상 개체수 비교

담수의 종류(낙동강물, 수돗물, 저수지물)에 따라 소상한 실뱀장어 개체수를 비교하였다. 수돗물은 수조에 2~3일 담아 두어 염소를 제거하고 사용하였다. 각 담수 종류에 따

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

Moon						
Neap tide			Spring tide			
N	MEAN	STD	N	MEAN	STD	
30	3.33	2.85	30	6.33	4.03	
		Leven's equal variance test		DF	t	Pr> t
		F	Pr>F			
Variance equal		2	0.0674	58.0	-3.32	0.0015
Unequal				52.2	-3.32	0.0016

Means with the same letter are not significantly different.

라 50 마리 중 낙동강물에는 8.33 마리, 저수지물에는 2.67 마리가 소상하였으나, 수돗물에서는 소상하지 않았으며(Fig. 2), 이들간 유의한 차이가 있었다($p < 0.05$) (Table 4). Duncan의 다중비교 결과, 저수지물과 수돗물에 비해 낙동강물로 소상이 많은 것으로 나타났다(Table 4). 따라서 이후 실험에서는 담수는 낙동강 물을 사용하였다.

2) 월령에 따른 소상 개체수 비교

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

3) 조석 주기에 따른 소상 개체수 비교

조석 시간(썰물, 밀물)에 따라 소상한 실뱀장어 개체수를 비교하였다. 썰물 시기와 밀물 시기 동안에 통계적으로 유의한 차이는 없었다(Table 6). 그러나 조위에 따라 고조위, 중조위, 저조위로 나누었을 때는 50 마리 중 고조위 때 15

마리, 중조위 때 8.83 마리, 저조위 때 7.67 마리가 소상하여(Fig. 4), 소상량 차이가 유의하였다($p < 0.05$). Duncan의 다중비교 결과, 고조위 때는 중조위, 저조위 때보다 소상량이 많았다(Table 6).

4) 낮과 밤에 따른 소상 개체수 비교

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

5) 어도 경사도에 따른 소상 개체수 비교

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

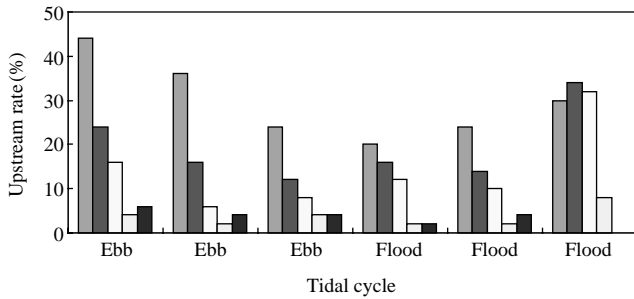


Fig. 4. Variation in upstream rate of glass eels according to the ladder gradients ($10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ and 50° from the left to the right) during the ebb and flood tides.

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

		Day-Night			
		Day		Night	
N	MEAN	STD	N	MEAN	STD
30	3.53	2.33	30	6.13	4.49
		Leven's equal variance test		DF	t
		F	Pr > F		Pr > t
Variance equal	3.72	0.0007	58	-2.81	0.0067
Unequal			43.5	-2.81	0.0073

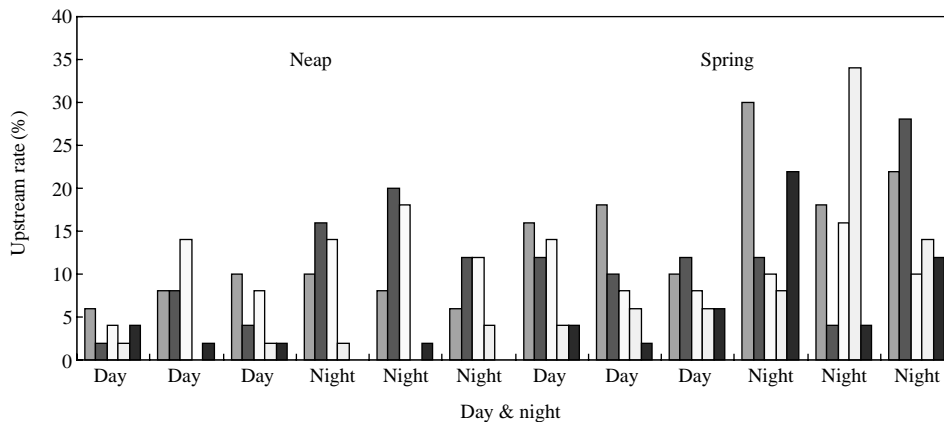


Fig. 5. Variation in upstream rate of glass eels according to the ladder gradients ($10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ and 50° from the left to the right) during the day and night.

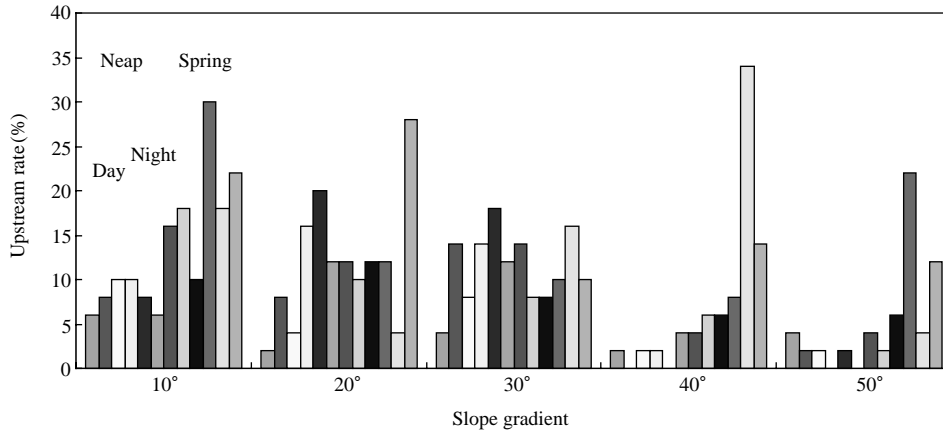


Fig. 6. Variation in upstream rate of glass eels according to ladder gradients (10°, 20°, 30°, 40° and 50°). Each vertical bar indicates the upstream rates during the day and night at the neap tide, and the day and night at the spring tide (from the left to the right) according to each ladder gradient.

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

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

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

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

Means with the same letter are not significantly different.

6) 어도 경사면 길이에 따른 소상 개체수 비교

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

7) 어도 바닥 재질에 따른 소상 개체수 비교

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

8) 유속에 따른 소상 개체수 비교

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

고찰

왕복성 어류는 오랜 진화 과정을 통하여 산란, 서식처 이용 또는 피·포식의 경쟁 등의 이유로 강과 바다를 왕래하는 것으로 알려져 있다. 뱀장어는 뱃뱀장어기를 바다에서 보내고 실뱀장어가 하구를 통해 강으로 회유한다. 이때는

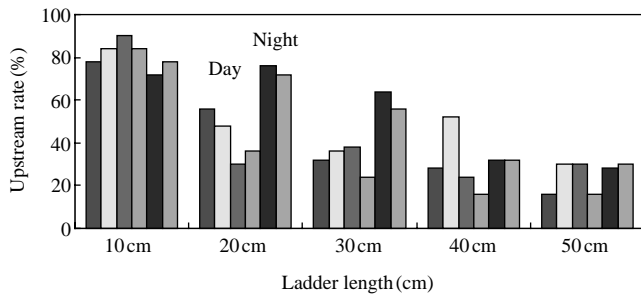


Fig. 7. Variation in upstream rate of glass eels according to ladder lengths (10, 20, 30, 40 and 50 cm). Vertical bar indicates the three replicated attempts during the day and during the night (from the left to the right) according to each ladder length.

고염에서 저염으로 서식처 이동을 하는 시기로 이에 적응하는 삼투압 조절이 진행되고 있을 것이다. 그러나 역으로 저염에서 고염으로 서식환경이 바뀌었을 때는 생존하기 어려

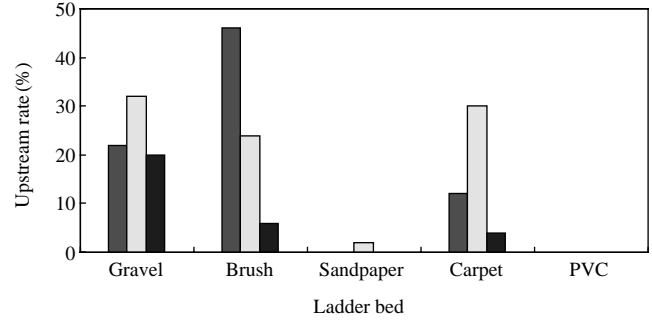


Fig. 8. Variation in upstream rate of glass eels according to ladder bed materials (gravel, brush, sandpaper, carpet and PVC). Each vertical bar indicates three replicated attempts.

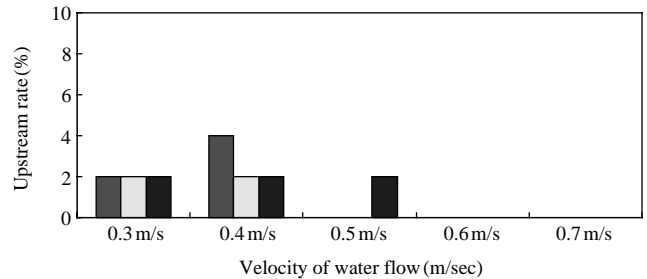


Fig. 9. Variation in upstream rate of glass eels according to velocity of water flow (0.3, 0.4, 0.5, 0.6 and 0.7 m/sec). Each vertical bar indicates three replicated attempts.

Table 9. Result of ANOVA to compare the average number of glass eels moved up through the slope according to ladder length

		Length														
		10 cm			20 cm			30 cm			40 cm			50 cm		
N	MEAN	STD	N	MEAN	STD	N	MEAN	STD	N	MEAN	STD	N	MEAN	STD		
6	40.50	3.15	6	26.50	9.33	6	20.83	7.53	6	15.33	6.02	6	12.50	3.51		
Source	DF	SS	MS	F	Pr > F											
Length	4	2952.80	738.20	18.15	< .0001											
Error	25	1016.67	40.67													
Duncan grouping	Mean	N	Length													
A	40.500	6	10													
B	26.500	6	20													
B																
C	20.833	6	30													
C	15.333	6	50													
C																
C	12.500	6	40													

Means with the same letter are not significantly different.

Table 10. Result of ANOVA to compare the average number of glass eels moved up through the slope according to ladder bed (gravel, brush, sandpaper, carpet and PVC)

Bed															
Gravel			Brush			Sandpaper			Carpet			PVC			
N	MEAN	STD	N	MEAN	STD	N	MEAN	STD	N	MEAN	STD	N	MEAN	STD	
3	12.33	3.21	3	12.67	10.02	3	0.33	0.58	3	7.67	6.66	3	0.00	0.00	
Source	DF	SS	MS	F	Pr>F										
Bed	4	460.93	115.23	3.71	<0.0422										
Error	10	310.67	31.07												
Duncan grouping	Mean	N	Bed												
A	12.667	3	Brush												
A															
A	12.333	3	Gravel												
A															
B	7.667	3	Carpet												
B															
B	0.333	3	Sand paper												
B															
B	0.000	3	PVC												

Means with the same letter are not significantly different.

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

Velocity															
0.3 m/sec			0.4 m/sec			0.5 m/sec			0.6 m/sec			0.7 m/sec			
N	MEAN	STD	N	MEAN	STD	N	MEAN	STD	N	MEAN	STD	N	MEAN	STD	
3	1.00	0.00	3	1.33	0.58	3	1.33	0.58	3	0.00	0.00	3	0.00	0.00	
Source	DF	SS	MS	F	Pr>F										
Velocity	4	4.40	1.10	8.25	<.0033										
Error	10	1.33	0.13												
Duncan grouping	Mean	N	Velocity												
A	1.3333	3	0.4												
A															
A	1.0000	3	0.3												
B	0.3333	3	0.5												
B															
B	0.0000	3	0.6												
B															
B	0.0000	3	0.7												

Means with the same letter are not significantly different.

운 것으로 나타났다(Table 2). 또한, 실뱀장어가 하구에 소 상하는 시기는 연중 수온이 낮은 시기이며(이, 2003), 이후 수온 상승에 적응하게 됨으로 갑자기 수온을 낮추었을 때 사망하여 실뱀장어가 수온 변화에도 생리적으로 민감하게 반응하였다(Kim *et al.*, 2002). 따라서, 실뱀장어가 생활사 진행에 역행하는 환경 변화에는 순치하기 어려운 것으로 판단된다.

국내 하천의 보와 하구의 독에 설치된 어도는 외국의 사례를 참고하여 연어, 은어와 같은 유영력이 강한 어류를 대상으로 설계되어 있어(황, 2000, 2003), 유영력이 약한 왕복성 어류의 이동이 차단되어 독을 중심으로 해수역과 담수역의 어류 종조성이 다르게 나타나는 등 어도의 제 기능을 다 하지 못하고 있다(양 등, 2001). 그러나 이와 달리 뱀장어의 생태와 행동 특성을 고려하여 어도를 설치하였을 때, 시간

이 지남에 따라 생물량이 증가하였다 (Fontenelle *et al.*, 2001; Briand *et al.*, 2005). 따라서 실뱀장어 최적 소상을 위해 국내 하구 생태에 맞는 적정 어도 개발이 절실하다. 적정 어도 조건을 찾아내기 위한 모형어도실험에서 실험 조건이 달라 소상량의 절대값은 차이가 있을 수 있어 같은 조건에서 상대값으로 비교하였다.

실뱀장어는 조석주기가 생체리듬으로 내재되어 있어 (Kim *et al.*, 2002, 2006), 대조기와 고조위에서 활동성이 강해 어도 소상에도 유리한 것으로 판단된다 (Table 6). 실뱀장어는 불을 비추었을 때 불빛을 피하였고 낮에는 은폐물에 숨어 있었으며 밤에는 왕성한 활동이 관찰되었고 (Table 3), 낮보다 밤에 소상량이 많아 (Fig. 5), 음성주광성임을 알 수 있었다.

실뱀장어 소상에 가장 중요한 어도 조건은 어도 경사면에 흐르는 물의 유속이다 (Fig. 9; Table 11). 유속을 최대한 줄이기 위해서는 강한 물의 흐름을 밖으로 빼는 수로를 만들어 최소 유속을 유지하는 것이 관건이다. 실뱀장어는 기어 오르는 행동을 보임으로써 미끄러운 어도 바닥은 소상에 불리하다 (Fig. 8; Table 10). 따라서 솔, 자갈, 카펫과 같이 거친 재질의 바닥이 흘러 내려오는 물의 유속을 감소시키고 실뱀장어가 미끄러지지 않게 할 수 있어 소상에 유리한 것으로 판단된다. 특히, 솔은 물이 흘러 내려올 때 실뱀장어가 휩쓸리지 않게 지지할 수 있게 함으로써 가장 적당한 바닥 소재로 판단된다. 어도 경사 각도는 완만할수록 좋으며 (Fig. 6; Table 8), 이럴 경우 어도의 길이가 길어지는 단점이 있다. 그런데 어도의 길이는 짧을수록 좋으나 (Fig. 7; Table 9), 소상하는 시간이 길어지면 어도 길이와는 무관한 것으로 판단된다. 일직선의 어도 경사면이 길 경우, 유량이 많아지거나 유속이 세지면 휩쓸릴 수가 있고 공기에 장기간 노출 될 경우 마르거나 조류의 표적이 될 수 있어 갈지자형으로 구부리고 방향이 전환 되는 곳에 못을 만들고 위를 덮어 건조를 막는다면 여러 문제점의 해결과 함께 포식자로부터 보호할 수 있을 것으로 판단된다. 본 실험 결과를 종합하면, 실뱀장어는 대조기 고조위에 가까운 밀물 때 야간에 주로 소상하며, 실뱀장어가 효과적으로 소상할 수 있는 어도는 경사면 각도가 30° 이하로 경사면을 흐르는 수량이 적고 유속은 0.4 m/sec 이하로, 바닥에는 실뱀장어가 기어오르며 쉴 수 있는 솔이나 잔자갈들을 설치하였을 때 효과적으로 소상할 수 있을 것으로 판단된다.

요 약

실뱀장어용 생태 어도를 설계하기 위하여 2008년 실뱀장어 소상 시기인 3~5월에 국립수산과학원 어군행동실험실에 실뱀장어가 소상하는 하구 및 하구둑과 어도를 재현하는

모형 어도를 제작하여 다양한 소상 환경과 어도 조건에서 실뱀장어의 소상행동을 관찰 분석하였다. 아래 해수조에 순치한 실뱀장어를 두고 위 담수조의 담수를 아래로 흐르게 하면서 해수조에서 어도를 통해 담수조로 소상한 실뱀장어의 개체수를 비교하고, 실뱀장어의 소상 행동을 관찰하여 최적 소상을 위한 적정 어도 조건을 추정하였다. 실뱀장어는 수돗물로는 소상하지 않았고, 저수지물보다 강물을 선호하였다. 실뱀장어 소상량은 소조기보다 대조기에 유의하게 많았고 ($p < 0.05$), 낮보다 밤에 유의하게 많았다 ($p < 0.05$). 실뱀장어 소상량은 저조위보다 고조위에서 유의하게 많았다 ($p < 0.05$). 실뱀장어는 어도 경사면 길이가 짧을수록 소상량이 많았고, 경사도는 30° 이하가 효율적이었다 ($p < 0.05$). 유속은 0.4 m/sec 이하로 물이 약하게 흐를 때 소상량이 많았다 ($p < 0.05$). 어도의 바닥은 솔, 자갈 및 카펫 등과 같이 거친 재질에서 소상량이 유의하게 많았다 ($p < 0.05$).

사 사

실험을 도와준 김진환, 모형어도를 제작한 조선현과 EMTS의 임홍수, 김상희 대표, 실뱀장어를 채포해준 김정길, 하영두, 서병안 그리고 실험을 위해 편의를 제공해준 국립수산과학원 수산공학동 어군행동실험실 관계자께 감사드립니다.

이 연구는 한국해양수산기술진흥원 수산특정연구개발과제 ‘하구역에서의 뱀장어 생태와 어도 개선 방안-뱀장어 어도 설계를 위한 소상 행동 연구’의 지원으로 국립수산과학원 연구사업 (RP-2008-FR-031)으로 수행되었습니다.

인 용 문 헌

김을배. 1974. 제주도산 실뱀장어의 소상 동태에 관하 연구: 특히 환경요인과의 관계를 중심으로. 한국육수학회지, 7: 1-22.
 문형태. 2002. 실뱀장어 이식의 미세구조와 어획 자료를 이용한 뱀장어 *Anguilla japonica*의 초기 생활사. 충남대학교 대학원 박사학위논문, 111pp.
 양홍준 · 김구환 · 금지돈. 2001. 낙동강하구의 어류상과 댐의 어도에서 어류의 이동. 한국육수학회지, 34: 251-258.
 전승관 · 주광현 · 주태근. 1971. 뱀장어 양식시험. 국립수산진흥원 사업보고(담수양식) 제8호, 국립수산진흥원, 부산, pp. 7-36.
 이태원. 2003. 실뱀장어 자원 예측을 위한 뱀장어 초기 생활사와 소상 생태 연구. 수산특정연구과제최종보고서(과제번호: 20000137), 85pp.
 황중서. 2000. 농업기반시설의 어도설치 현황과 개선 방안. 한국수자원학회지, 33: 41-52.
 황중서. 2003. 댐의 어도 설치 현황과 개선방안. 한국환경생태학회 2003년도 추계학술논문발표회 논문집, pp. 73-104.

- Aida, K., K. Tsukamoto and K. Yamauchi. 2003. Eel Biology. Springer-Verlag, Tokyo, 497pp.
- Briand, C., D. Fatin, G. Fontenelle and E. Feunteun. 2005. Effect of re-opening of a migratory pathway for eel (*Anguilla anguilla*, L.) at a watershed scale. Bull. Fr. Peche Piscic., 378-379: 67-86.
- Cheng, P.W. and W.N. Tzeng. 1996. Timing of metamorphosis and estuarine arrival across the dispersal range of the Japanese eel *Anguilla japonica*. Mar. Ecol. Prog. Ser., 131: 87-96.
- Chow, S., H. Kurogi, N. Mochioka, S. Kaji, M. Okazaki and K. Tsukamoto. 2009. Discovery of mature freshwater eels in the open ocean. Fish. Sci., 75: 257-259.
- Deelder, C.L. 1970. Synopsis of biological data on the eel *Anguilla anguilla* (Linnaeus) 1758, Rome. 68pp.
- Dekker, W. 2003. Worldwide decline of eel resources necessitates immediate action-Quebec Declaration of Concern. Fisheries, 28: 28-30.
- Fontenelle, G., C. Briand and E. Feunteun. 2001. Eel management in France: how are we to face the dilemma of a European wide species?. J. Taiwan Fish. Res., 9: 237-250.
<http://www.nypa.gov/press/2005//050902bpr.htm>
<http://www.fish-pass.fr>
- Kim, D.J., J.Y. Bae and E.O. Kim. 2007. Changes in sex steroid hormones and ovarian development during artificial maturation of female eel, *Anguilla japonica*. Integrative Bioscience, 11: 117-124.
- Kim, W.S., S.J. Yoon., H.T. Moon. and T.W. Lee. 2002. Effects of water temperature changes on the endogenous and exogenous rhythm of oxygen consumption in the glass eels *Anguilla japonica*. Marine Ecology Progress Series, 243: 209-216.
- Kim, W.S., S.J. Yoon., J.W. Kim., J.A. Lee and T.W. Lee. 2006. Metabolic response under different salinity and temperature conditions for glass eel *Anguilla japonica*, Marine Biology, 149: 1209-1215.
- Liew, P.K.L. 1982. Impact of the eel ladder on the upstream migrating eel (*Anguilla rostrata*) population in the St. Lawrence River at Cornwall: 1974-1978. In: Loftus, K.H. (ed.), Proc 1980 N. Am. Eel Conf. Ontario Fish. Tech. Rep. Ser., Vol. 4. Ministry of Natural Resources, Ontario, pp. 17-22.
- SAS. 1989. SAS/STAT User's Guide. Ver. 6. Cary. NC, SAS Institute Inc.
- 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. In: Proceedings of the International Symposium on advances in Eel Biology. Univ. of Tokyo. Sept. 28-30, pp. 89-91.
- Tanaka, H., H. Kagawa and H. Ohta. 2001. Production of leptocephali of Japanese eel, *Anguilla japonica* in captivity. Aquaculture, 201: 51-60.
- Tesch, F.-W. 2003. The Eel (3rd edition). Blackwell Science, Iowa. 408pp.
- Tsukamoto, K. 1990. Recruitment mechanism of the eel, *Anguilla japonica*, to the Japanese coast. J. Fish Biol, 36: 659-671.
- Tsukamoto, K., T. Otake, N. Mochioka, T.-W. Lee, H. Fricke, T. Inagaki, J. Aoyama, S. Ishikawa, S. Kimura, M.J. Miller, H. Hasumoto, M. Oya and Y. Suzuki. 2003. Seamounds, new moon and eel spawning: The search for the spawning site of the Japanese eel. Environ. Biol. Fish., 66: 221-229.
- Tzeng, W.N. 1985. Immigration timing and activity rhythms of the eel, *Anguilla japonica*, elvers in the estuary of northern Taiwan, with emphasis on environmental influences. Bull. Jap. Soc. Fish. Oceanogr., No. 47/48: 11-27.
- Watanabe, S., J. Aoyama and K. Tsukamoto. 2004. Reexamination of Ege's (1939) use of taxonomic characters of the genus *Anguilla*. Bull. Mar. Sci., 74: 337-351.
- Watanabe, S., J. Aoyama and K. Tsukamoto. 2009. A new species of freshwater eel *Anguilla luzonensis* (Teleostei: Anguillidae) from Luzon Island of the Philippines. Fish. Sci., 75: 387-392.
- Yamamoto, K. and K. Yamauchi. 1974. Sexual maturation of Japanese eel and production of eel larvae in the aquarium. Nature, 251: 220-222.
- Yamauchi, K., M. Nakamura, H. Takahashi and K. Takano. 1976. Cultivation of larvae of Japanese eel. Nature, 263: 412.