

공학석사 학위논문

동북아산 뱀장어(*Anguilla japonica*)의 산소소비  
리듬에 대한 수온변화 영향

*Effects of water temperature changes on the oxygen  
consumption rhythm in Japanese eel, Anguilla japonica*

지도교수 노 일

2004년 2월

한국해양대학교 대학원

토목환경공학과

김 종 욱

본 논문을 김종욱의 공학석사 학위논문으로 인준함

위원장 : 이학박사 김 완 수 (인)

위원 : 이학박사 노 일 (인)

위원 : 이학박사 박 인 석 (인)

2003년 12월

한국해양대학교 대학원

# Effects of water temperature changes on the oxygen consumption rhythm in Japanese eel, *Anguilla japonica*

by  
Jong-Wook Kim

Department of Ocean Environment Engineering  
Graduate School of Korea Maritime University

## **Abstract**

This study investigated the effects of temperature changes on the oxygen consumption rhythm in the Japanese eels, *Anguilla japonica*, using an automatic intermittent flow respirometer (AIFR). The experiments for the oxygen consumption rate (OCR) were carried out for two groups of the eels, i.e., adult (yellow eel) and juvenile stage (glass eel). Both of the freshly collected wild yellow and glass eels displayed a strong endogenous circatidal rhythm under constant temperature and darkness.

Especially, the glass eels which removed from their natural environment (estuary) and continuously maintained for six weeks under the condition of darkness, exhibited a clear endogenous circatidal

rhythm in OCR. This results suggest that, yellow and glass eels collected from the brackish waters and the estuary likely exhibit responses that correspond to the tides in their original wild environments.

The magnitude of OCR of glass eels exhibited a highly variable range from 0.02 to 0.52 ml O<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> WW h<sup>-1</sup> as the temperature increased from 12 to 25°C. According to the change of temperature, the OCR of glass eels coincided with the gradual increase of water temperature (1°C/24 h) in the experimental chamber. This results indicate that the glass eels were sensitively subject to environmental factors such as water temperature changes as little as 1°C.

The magnitude of the mean OCR (mOCR) of yellow eels showed a highly variable range from 13.5 to 237.7 ml O<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> WW h<sup>-1</sup> under constant conditions. In case of increasing temperature (0.5°C 14 h<sup>-1</sup>) from 25 to 40°C, the mOCR of yellow eels exhibited a gradual increase showing the rhythmic pattern to 36°C. Above 36°C, the rhythms of the OCR dampened and then the mOCR decreased rapidly around 36 - 37°C. The OCR of yellow eels exhibited a maximum value at 38°C and sharply decreased after that. This results suggest that the critical thermal maximum (CTM) of the yellow eels was around 38°C when water temperature increased by 0.5°C/14 h following acclimation at 25°C.

In case of decreasing temperature (0.5°C 14 h<sup>-1</sup>) from 25 to 10°C, the mOCR of yellow eels displayed gradually a decrease to 23°C. However, around 20 - 23°C, there was an agitation which showed a

slight increase in the mOCR during one or two days. This results suggest that these changes of the metabolic activity in this species may be related to physiological processes in this temperature regime.

# 목 차

Abstract .....	i
그림 목차 .....	v
표 목차 .....	x
I. 서 론 .....	1
II. 재료 및 방법 .....	8
II-1. 시료채집 및 자료수집 .....	8
II-2. 실험방법 .....	10
II-3. 자료분석 .....	13
III. 결 과 .....	15
III-1. 수온변화에 대한 실뱀장어의 산소소비율 .....	15
III-2. 일정수온에서 성장기 뱀장어의 산소소비율 .....	19
III-3. 수온증가에 따른 성장기 뱀장어의 산소소비율 .....	22
III-4. 수온감소에 따른 성장기 뱀장어의 산소소비율 .....	27
IV. 토 의 .....	35
V. 결 론 .....	41
VI. 참고 문헌 .....	43

## List of Figures

- Fig. 1. Life cycle of Japanese eels, *Anguilla japonica*. ..... 2
- Fig. 2. Schematic representation of migration pattern of *Anguilla japonica* in the northwestern Pacific. .... 3
- Fig. 3. Sampling sites of Japanese eels, *Anguilla japonica*. Black circles (●) are displayed the sites for the yellow eels, white circle (○) represent site for glass eels. .... 9
- Fig. 4. Schematic of Automatic Intermittent-Flow-Respirometer (AIFR) for measuring oxygen consumption in Japanese eel, *Anguilla japonica*. 1: Air compressor; 2: Air valve controller; 3: Pump controller; 4: Printer; 5: Computer for control and data storage; 6: Air pressure sensor; 7: Picoammeter; 8: Three-way valve; 9: Tooth wheel pump; 10: Temperature sensor; 11: Oxygen sensor; 12: Test chamber; 12-1: Silicon ring; 13: Reservoir container. .... 14
- Fig. 5. **A**: Patterns of the oxygen consumption rate (OCR:  $\text{ml O}_2 \text{ g}^{-1} \text{ WW h}^{-1}$ ) by 5 fasted glass eels, *Anguilla japonica* ( $5.3 \pm 0.05$  cm,  $0.07 \pm 0.01$  g), which were subjected to constant temperature ( $12^\circ\text{C}$ ), during 326 h period at 27.5‰. **B**: Maximum entropy spectral analysis (MESA) spectra from

data presented in Fig 5**A**. Arrows indicate scheduled times of high tide at the collection site. .... 16

Fig. 6. **A**: Patterns of the oxygen consumption rate (OCR:  $\text{ml O}_2 \text{ g}^{-1} \text{ WW h}^{-1}$ ) by 5 fasted glass eels, *Anguilla japonica* ( $5.5 \pm 0.11$  cm,  $0.09 \pm 0.01$  g), which were subjected to constant temperature ( $13^\circ\text{C}$ ), during 267 h period at 13.5‰. **B**: Maximum entropy spectral analysis (MESA) spectra from data presented in Fig. 6**A**. Arrows indicate scheduled times of high tide at the collection site. .... 17

Fig. 7. **A**: Patterns of the oxygen consumption rate (OCR:  $\text{ml O}_2 \text{ g}^{-1} \text{ WW h}^{-1}$ ) by 5 fasted glass eels, *Anguilla japonica* ( $5.3 \pm 0.25$  cm,  $0.09 \pm 0.01$  g), which were subjected to temperature increase from 10 to  $25^\circ\text{C}$ , during 386 h period ( $\Delta t = 1^\circ\text{C } 24 \text{ h}^{-1}$ ) at 20.7‰. **B**: Maximum entropy spectral analysis (MESA) spectra from data presented in Fig. 7**A**. .... 18

Fig. 8. **A**: Patterns of the oxygen consumption rate (OCR:  $\text{ml O}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ WW h}^{-1}$ ) by a yellow eel, *Anguilla japonica* (49 cm, 200 g), which were exposed to constant temperature at  $25^\circ\text{C}$  under 0‰. Half dark circle (◐) indicated the warning moon and dark circle (●) indicated the old moon. **B**: Maximum entropy spectral analysis (MESA) spectra from data presented in Fig. 8**A-a**. .... 20

Fig. 9. **A:** Patterns of the oxygen consumption rate (OCR:  $\text{ml O}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ WW h}^{-1}$ ) by a yellow eel, *Anguilla japonica* (46 cm, 180 g), which were subjected to constant temperature at 25°C under 25‰. **B:** Maximum entropy spectral analysis (MESA) spectra from data presented in Fig. 9**A**. Arrows indicate scheduled times of high tide at the collection site. .... 21

Fig. 10. **A:** Patterns of the oxygen consumption rate (OCR:  $\text{ml O}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ WW h}^{-1}$ ) by a yellow eel, *Anguilla japonica* (45 cm, 120 g), which were subjected to a temperature increase from 25 to 40°C, during 467 h period ( $\Delta t = 0.5^\circ\text{C } 14 \text{ h}^{-1}$ ) at 0‰. **B:** Maximum entropy spectral analysis (MESA) spectra from data presented in Fig. 10**A-a**. .... 24

Fig. 11. **A:** Patterns of the oxygen consumption rate (OCR:  $\text{ml O}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ WW h}^{-1}$ ) by a yellow eel, *Anguilla japonica* (47 cm, 150 g), which were subjected to a temperature increase from 25 to 40°C, during 392 h period ( $\Delta t = 0.5^\circ\text{C } 14 \text{ h}^{-1}$ ) at 25‰. **B:** Maximum entropy spectral analysis (MESA) spectra from data presented in Fig. 11**A-a**. .... 25

Fig. 12. **A:** Patterns of the oxygen consumption rate (OCR:  $\text{ml O}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ WW h}^{-1}$ ) by a yellow eel, *Anguilla japonica* (43 cm, 110 g), which were subjected to a temperature increase from 25 to 40°C, during 362 h period ( $\Delta t = 0.5^\circ\text{C } 14 \text{ h}^{-1}$ ) at 32‰. **B:**

Maximum entropy spectral analysis (MESA) spectra from data presented in Fig. 12 <b>A-a</b> . .....	26
Fig. 13. <b>A</b> : Patterns of the oxygen consumption rate (OCR: $\text{ml O}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ WW h}^{-1}$ ) by a yellow eel, <i>Anguilla japonica</i> (38 cm, 80 g), which were subjected to a temperature decrease from 25 to 0°C, during 467 h period ( $\Delta t = 0.5^\circ\text{C } 14 \text{ h}^{-1}$ ) at 0‰. <b>B</b> : Maximum entropy spectral analysis (MESA) spectra from data presented in Fig. 13 <b>A-a</b> . .....	29
Fig. 14. <b>A</b> : Patterns of the oxygen consumption rate (OCR: $\text{ml O}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ WW h}^{-1}$ ) by a yellow eel, <i>Anguilla japonica</i> (47 cm, 120 g), which were subjected to a temperature decrease from 25 to 1 0°C, during 511 h period ( $\Delta t = 0.5^\circ\text{C } 14 \text{ h}^{-1}$ ) at 25‰. <b>B</b> : Maximum entropy spectral analysis (MESA) spectra from data presented in Fig. 14 <b>A-a</b> . .....	30
Fig. 15. <b>A</b> : Patterns of the oxygen consumption rate (OCR: $\text{ml O}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ WW h}^{-1}$ ) by a yellow eel, <i>Anguilla japonica</i> (64 cm, 300 g), which were subjected to temperature decrease from 25 to 0°C, during 322 h period ( $\Delta t = 0.5^\circ\text{C } 14 \text{ h}^{-1}$ ) at 32‰. <b>B</b> : Maximum entropy spectral analysis (MESA) spectra from data presented in Fig. 15 <b>A-a</b> . .....	31
Fig. 16. <b>A</b> : Patterns of the oxygen consumption rate (OCR: $\text{ml O}_2 \text{ kg}^{-1}$	

WW h<sup>-1</sup>) by a yellow eel, *Anguilla japonica* (73 cm, 680 g), which were subjected to temperature decrease from 25 to 0°C, during 781 h period ( $\Delta t = 0.5^\circ\text{C } 14 \text{ h}^{-1}$ ) at 32‰. **B**: Maximum entropy spectral analysis (MESA) spectra from data presented in Fig. 16**A-a**. ..... 32

## List of Tables

Table 1. Experimental parameters under constant condition and increasing temperature of glass eels, <i>Anguilla japonica</i> . .....	33
Table 2. Experimental parameters under constant temperature of yellow eels, <i>Anguilla japonica</i> . .....	33
Table 3. Experimental parameters under increasing temperature of yellow eels, <i>Anguilla japonica</i> . .....	34
Table 4. Experimental parameters under decreasing temperature of yellow eels, <i>Anguilla japonica</i> . .....	34

## I. 서 론

뱀장어속(Genus *Anguilla*) 어류는 강하성(catadromous) 어류로서, 전 세계적으로 아종을 포함하여 18종이 분포한다(Ginoue et al., 2001). 그 중에서 12종이 열대지역에, 6종이 태평양과 대서양연안의 온대지역에서 주로 발견된다.

뱀장어는 성장단계에 따라 알에서 부화하여 대양에서 회유하는 뱃꼬뱀장어 단계(leptocephalus stage), 뱃꼬뱀장어에서 실뱀장어로 변태하는 변태기(metamorphic stage), 변태 후 몸이 투명한 상태로 대륙붕을 회유하여 강 하구에 이르는 실뱀장어 단계(glass eel stage), 몸의 표면에 착색이 시작되는 elver 단계(elver stage), 그리고 강인 하구에서 자라는 미성숙 뱀장어 단계(yellow eel stage)를 거쳐 산란장으로 회유하는 성숙뱀장어단계(silver eel stage)로 구분된다(Fig. 1, Bertin, 1956).

뱀장어는 생태가 특이하고, 수산경제적으로도 중요하여 생태 및 양식 기술에 대하여 많은 연구가 수행되었다. 특히, 해양성 부유 치어인 뱃꼬뱀장어(leptocephalus)와 실뱀장어(glass eel)에 관한 연구가 많이 수행되었다(Tsukamoto, 1990; Tzeng, 1990; Martin, 1995; Arai et al., 1997; Kawakami, et al., 1999; Arai et al., 2000). 근래에는 뱀장어 이석의 Sr/Ca ratio 를 분석하여, 정확한 변태기의 추정과 성장기 뱀장어가 해수, 기수 또는 담수에 서식한 기간도 추정할 수 있다(Tzeng and Tsai, 1992, 1994; Otake et al., 1994).

대서양 뱀장어인 유럽산 뱀장어(*Anguilla anguilla*)와 미국산 뱀장어(*A. rostrata*)의 경우, 산란장은 대서양의 Sargasso Sea (20 ~ 30°N, 50 ~ 75°W)로 추정되고 있다(Schmit, 1922). 동북아산 뱀장어(*A. japonica*)는 대만, 중국, 한국 그리고 일본열도에 이르는 북서태평양 연안에 넓게 분포하며(Tzeng et al., 2002), 동아시아에서는 상업적인 양식 산업에서 중요한

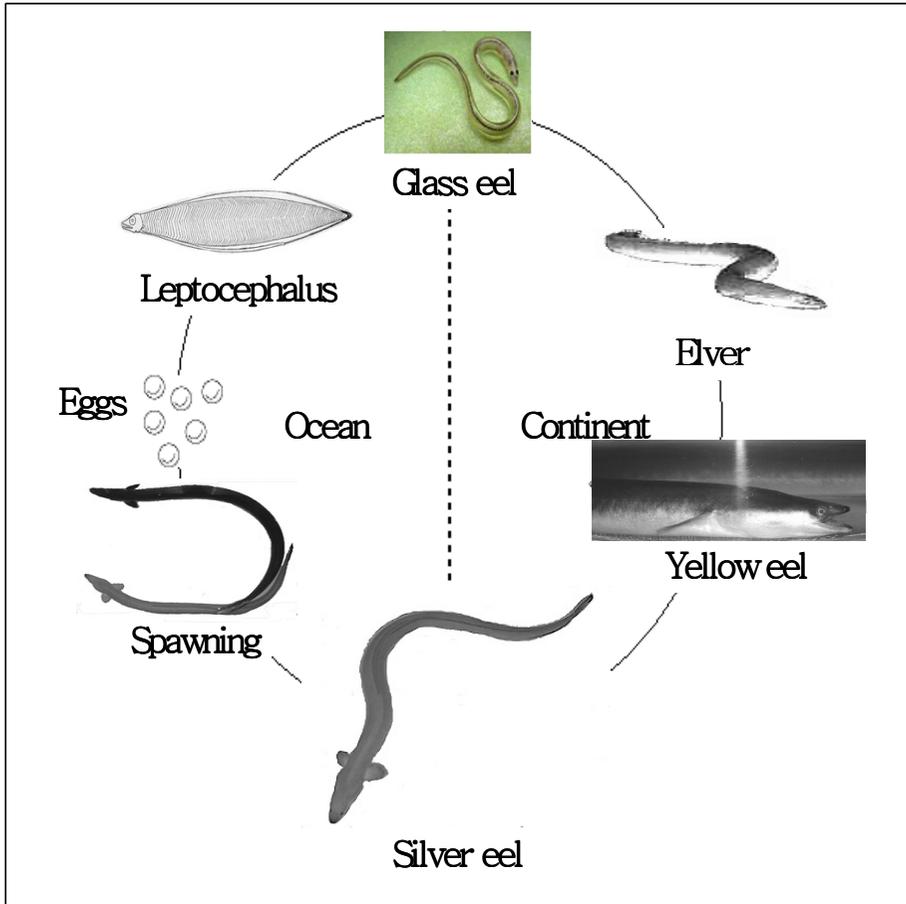


Fig. 1. Life cycle of Japanese eels, *Anguilla japonica*.

위치를 차지한다. 동북아산 뱀장어는 Mariana Ridge 근해에서 산란, 부화된 후, 치어인 뱃앞뱀장어시기를 거쳐 북적도 해류와 쿠로시오 해류를 따라 회유하며, 실뱀장어로 변태한 후 대륙붕을 거쳐 동아시아 연안인 대만, 중국, 한국 그리고 일본의 하천에서 성장하는 것으로 알려져 있다 (Tsukamoto, 1992). 강에서 성장을 마친 뱀장어들은 성적으로 성숙되면 다시 바다로 회유를 시작하는데, 대양의 산란장까지 수 천 km 를 이동하여 산란한 후 일생을 마치게 된다(Fig. 2, Tsukamoto, 1992).

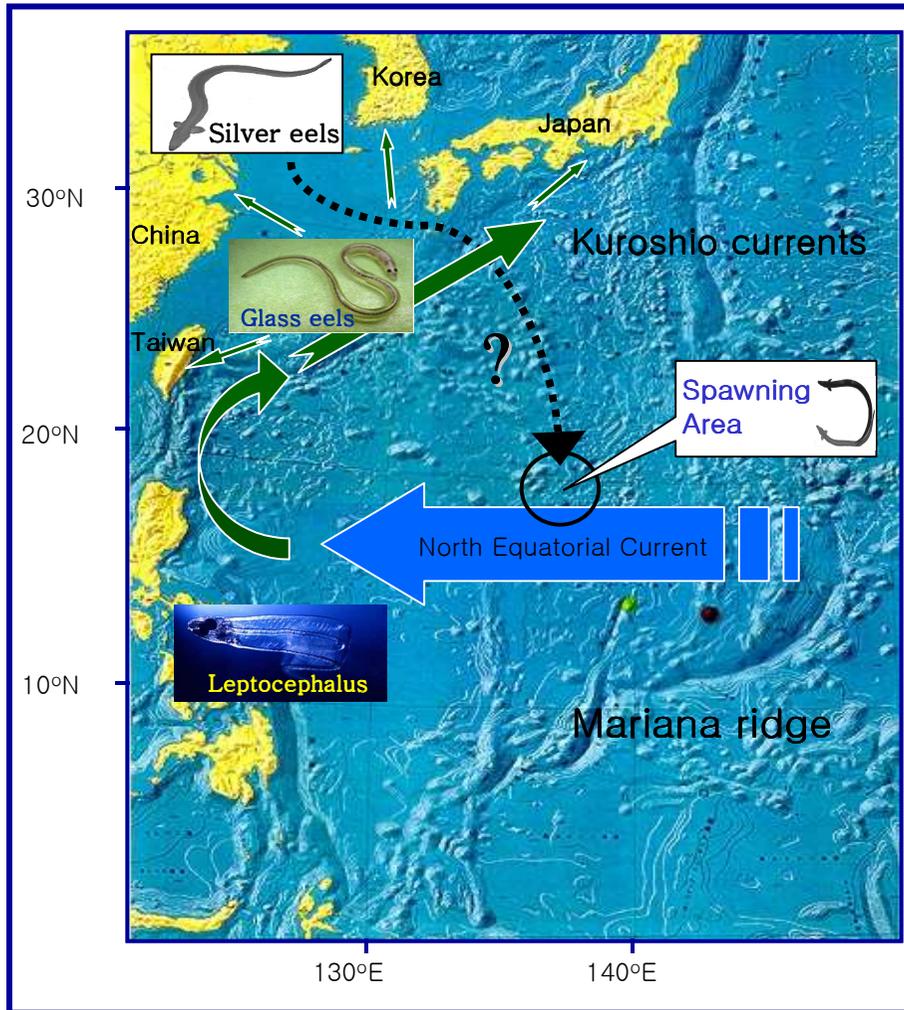


Fig. 2. Schematic representation of migration pattern of *Anguilla japonica* in the northwestern Pacific.

이와 같은 생활사적 특이성 때문에 뱀장어는 회유기간동안 다양한 수괴 환경을 접하면서 각각의 환경에 적응하기 위하여 부화 후 형태적으로 변태과정을 거치게 된다.

뱀장어의 자원량은 1980년대 이후 그들의 분포지역에서 성어뿐만 아니라 실뱀장어 단계까지 계속적으로 감소하고 있다(Westin, 2003). 유럽산 뱀장어의 경우, 뱀장어 자원량은 지난 30여년간 1/10배 이하로 감소한 것으로 추정되며(Feunteun, 2002), 미국산 뱀장어도 1990년대 이후 북미 대부분의 지역에서 어획량이 급격히 감소하였다(Casselmann, 2001). 국내 실뱀장어의 어획량은 1980년대 10 mt을 넘기도 하였으나, 1990년대에는 7 mt 정도가 어획되고 있으며, 1998년에는 2.5 mt로 감소하였다(문, 2002). 실뱀장어 어획량의 감소는 동북아산 뱀장어에만 국한 되지 않고 미국산 뱀장어와 유럽산 뱀장어에서도 비슷하게 나타나고 있다(Casselmann, 2001; Dekker, 2001).

일본에서도 1980년대 이후 실뱀장어뿐만 아니라 yellow eel과 silver eel의 어획량도 계속 감소하고 있으며(Tatsukawa, 2001), 대만도 이와 유사한 감소현상이 나타나고 있다(Tzeng et al, 1997). 이러한 뱀장어의 자원량 감소원인으로 실뱀장어 및 성어에 대한 남획, 서식지의 감소, 기후 및 해류의 변동, 댐 및 구조물에 의한 회유차단, 그리고 유해 기생충에 의한 질병 및 농약 또는 유독성 산업폐기물(PCBs)등에 의한 환경오염등을 들 수 있으나, 정확한 원인은 아직 밝혀지지 않고 있다.

뱀장어는 현재 인공종묘기술이 완전하게 개발되지 않은 상태이므로 하천으로 소상하는 실뱀장어를 채포하여 양식해야 한다. 그러나 뱀장어 양식이 성행하는 동북아시아에서는 소상하는 실뱀장어의 어획량이 수요량에 크게 못미치고 있는 상황이므로 양식에 큰 어려움이 있다. 따라서 어떠한 환경에서 실뱀장어가 잘 소상하는가에 대한 연구가 필요하다. 이에 대해

실뱀장어의 개체수와 소상시기에 관해 다양한 연구가 수행되었는데, 기수역에서 하천으로 소상하는 실뱀장어의 회유습성과 생태에 영향을 미치는 환경인자들(조석주기, 수온변화, 염분변화, 담수유입량 및 유속등)에 관한 연구가 많이 이루어졌다(Deelder, 1970).

많은 연구자들은 실뱀장어의 주 소상요인을 수온으로 보고 있다(Lee and Kim, 2001; Yamamoto et al., 2001; Tongiorgi et al., 1986; White and Knights, 1997; Hiyama, 1952; Tongiorgi et al., 1986). Jellyman and Ryan (1983)은 해수의 수온이 낮은 기간에 실뱀장어의 소상이 활발하게 나타났다고 보고했으며, Gandolfi et al. (1984)는 유럽산 뱀장어(*A. anguilla*)에 있어서 해수의 수온과 담수의 수온이 거의 같아지는 시기에 뱀장어의 소상이 최대로 나타났다고 보고하였다.

뱀장어의 회유에 있어서도 수온이 중요한 요인으로 작용한다. 동북아산 뱀장어(*A. japonica*)는 수온이 내려가는 가을에서 겨울 사이에 산란을 위해서 바다로 회유하는 것으로 알려져 있으며, 이 시기에 강물과 해수 사이의 수온차이가 중요한 회유자극 요인으로 보고된 바 있다(Burnet, 1969; Todd, 1981). 온대성 뱀장어인 대서양산 뱀장어(*A. anguilla* and *A. rostrata*)와 뉴질랜드산 뱀장어(*A. australis* and *A. dieffenbachi*)도 수온이 내려가는 가을부터 겨울 사이에 회유를 시작하는 것으로 보고되었다(Burnet, 1969; Westin and Nyman, 1979; Todd, 1981; Hividstein, 1985; Pursiainen and Tulonen, 1986; Haro, 1991). 이러한 사실들은 뱀장어의 회유습성이 수온과 밀접한 관련이 있음을 보여주는 증거라 할 수 있다.

1973년에 Yamamoto가 세계에서 최초로 성숙한 뱀장어 수컷과 암컷으로부터 인공적으로 수정, 부화에 성공하여 뱀장어 유생을 생산하는데 성공했다(Yamamoto and Yamauchi, 1974). 이 때의 수온이 23℃였으며, 인공부화된 뱀장어 유생은 수온이 22 ~ 23℃로 유지되는 사육수조에서 약

7 mm 크기로 성장한 후 사망한 것으로 보고되었다.

최근(2003년) 일본에서 인공적으로 부화시킨 뱀장어 8 개체를 체장 20 cm까지 사육한 보고가 있으나, 현재 인공부화된 뱀장어 치어가 성어로 성장하기 위해서는 수정란의 질, 유생의 먹이조건 및 사육시스템의 미비와 같은 문제점이 해결되어야 한다. 위의 실험이 뱀장어의 인공종묘생산에 있어서 성공한 경우라고 말하기에는 다소 무리가 있으나, 뱀장어의 온도영향에 관한 측면에서는 중요한 의미가 있다.

뱀장어는 상업적으로 중요한 양식어종일 뿐만 아니라 자원량이 현저히 줄어드는 상태에 있기 때문에, 뱀장어의 생태에 영향을 미치는 환경요인을 밝혀내는 것은 매우 중요한 일이다. 특히, 수온변화는 생물의 대사과정 및 산란과 같은 생리적 측면과 회유 및 행동양식과 같은 생태적 측면에 있어서 중요한 요소로 작용하며, 이미 많은 연구자들이 뱀장어가 수온변화에 민감하게 반응하는 것으로 보고하고 있다(Lee and Kim, 2001; Kim et al., 2002).

뱀장어의 경우, 선행되어온 대부분의 연구가 뱀장어의 출현 개체수와 환경 요인들간의 단기자료에 의존하여 뱀장어의 초기생활사 및 전반적인 생태와 관련된 수온과의 상관관계를 명확하게 밝히지는 못하였다. 더욱이 이러한 연구들은 대부분 생태학적으로 뱀장어의 회유와 관련된 최대, 최소 수온범위에 대한 결과들일 뿐 실질적으로 수온과 연관되어 생물의 체내에서 일어나는 생리적 반응에 대한 내용은 미비한 편이다.

뱀장어의 생태적 특성과 환경요인과의 상호 연관성을 알아내기 위해서는 장기간에 걸친 모니터링과 그에 따른 데이터의 수집, 분석이 필요하다. 이를 위해 외부환경요인을 변화시키면서 장시간에 걸쳐 생물체의 생리적 반응을 조사하면, 각 환경요소가 생물의 생체리듬과 생리활동에 어떠한 영향을 미치는지 알 수 있으며, 이를 근거로 생물체의 서식환경변화에 대

한 시·공간적 모니터링도 가능할 것이다.

본 연구에서는 뱀장어의 행동이나 생리적 변화에 영향을 미치는 가장 중요한 수온변화가 뱀장어에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위해 각각 다른 염분에서 수온변화에 따른 호흡생체리듬을 관찰하였다. 즉, 성장 단계별로 수온을 지속적으로 증가 또는 감소시키면서 나타날 수 있는 뱀장어들의 호흡패턴 변화를 관찰하였으며, 이러한 수온변화가 뱀장어의 생리적 기작과 생태에 미치는 영향과의 연관성을 밝히는데 그 목적이 있다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 시료채집 및 자료수집

실험에 사용된 뱀장어(*A. japonica*)는 제주도 천제연 하구, 금강 및 만경강 하구에서 채집되었다(Fig. 3). 실뱀장어는 제주도 천제연 하구(12°C, 27.5%)에서는 2003년 3월, 군산 금강 하구역(13°C, 17.4%)에서는 2001년 5월과 2003년 3월에 채집하였다. 실뱀장어는 야간에 활발하게 활동하므로 그름기간동안 야간에 주로 채집하였다. 채집에 사용된 dip net 은 망직경이 20 cm 정도이며 망목은 1 mm로 하였다. 실험에 이용된 실뱀장어의 전장의 평균은  $5.3 \pm 0.2$  cm (n=15), 체중의 평균은  $0.06 \pm 0.026$  g (n=15)이었으며, 채집 지역별로 5 개체씩 15 개체를 대상으로 실험하였다.

성장기 뱀장어(yellow eels)는 2003년 8월부터 9월에 걸쳐 금강 및 만경강 하구역에서 개량 안강망(bag net)을 이용하여 채집하였으며, 채집된 실험어중 총 18개체에 대해 실험하였다.

채집된 뱀장어는 즉시 실험실로 운반한 후, 세 그룹으로 나누어 32%, 25% 그리고 0%의 염분으로 조정된 수조에서 2주 동안 순치시켰다. 실뱀장어는 10 ℓ 수조에 넣어 항온기(BOD incubator; RI-50-1060, REVCO, NY, U.S.A) 내부에서 일정한 수온(13°C)을 유지하여 순치시켰으며, 뱀장어 성어들은 100 ℓ 수조에 상온(25°C) 상태에서 위와 동일한 염분범위로 조정하여 순치시켰다. 실험 전 2주간은 소화에 의한 산소소비율의 간접적인 영향을 방지하기 위해 절식상태를 유지시켰으며, 실험이 끝난 후에는 전장과 습중량을 측정하여 냉동보관하였다.

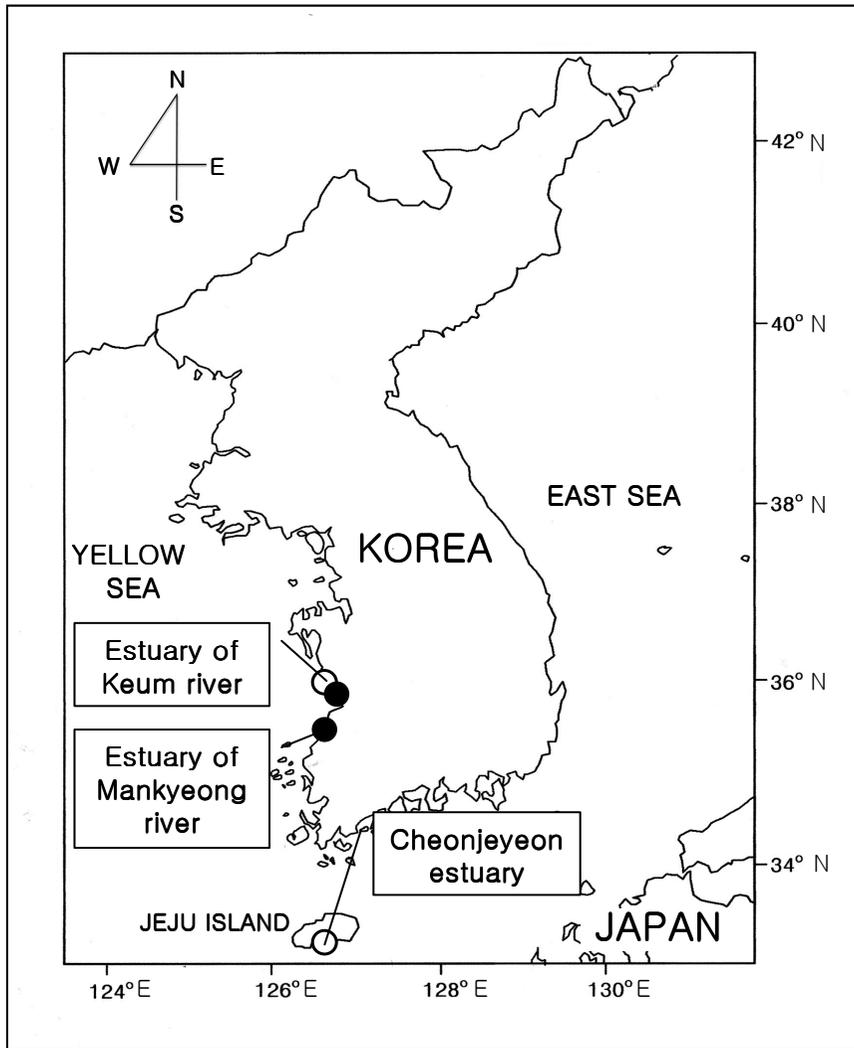


Fig. 3. Sampling sites of Japanese eels, *Anguilla japonica*. Black circles (●) are displayed the sites for the yellow eels, white circle (○) represent site for glass eels.

## 2. 실험방법

그림 4에서와 같은 자동호흡측정기를 사용하여 뱀장어의 수온변화에 따른 체내의 생리적 변동을 알아보기 위해 온도를 증가 또는 감소시키면서 연속적으로 산소소비율을 측정하여 호흡리듬을 관찰하였다. 실험 뱀장어의 경우, 두 그룹으로 나누어 일정한 수온 및 수온증가시의 산소소비패턴을 관찰하였다. 첫 번째 그룹은 평균체장  $5.3 \pm 0.05$  cm, 평균 체중  $0.07 \pm 0.01$  g의 실험뱀장어 5 개체에 대해 일정한 수온을 유지하면서 산소소비형태를 관찰하였다. 두 번째 그룹은 평균체장  $5.3 \pm 0.25$  cm, 평균체중  $0.09 \pm 0.01$  g의 뱀장어 5 개체에 대해 20.7%에서 24시간 단위로 10 ~ 25℃까지 1℃씩 수온을 증가시키면서 산소소비율을 측정하였다.

성장기 뱀장어의 경우는 세 그룹으로 나누어 각각의 그룹에 대해 서로 다른 염분의 해수를 적용하여 실험하였다. 첫번째 실험군은 평균체장  $47.0 \pm 2.8$  cm, 평균체중  $180.0 \pm 28.3$  g의 미성숙 뱀장어(yellow eels) 4개체를 대상으로 0%, 25%의 염분범위에서 일정한 수온을 유지하면서 산소소비율을 측정하였다. 두번째 그룹은 0%, 25%, 32%의 각기 다른 염분범위에서 생존이 가능한 최대온도 범위를 알아보기 위해 25℃에서부터 40℃까지 매 14시간마다 0.5℃씩 수온을 증가시키면서 산소소비율을 측정하였다. 수온변화는 생물의 내인성 조석주기 리듬과 차이를 두기 위해 14시간 단위로 증가시키면서 관찰하였다. 실험에 이용된 뱀장어는 평균체장  $43.2 \pm 2.1$  cm, 평균체중  $126.0 \pm 40.4$  g로 총 6개체를 대상으로 하였다.

세번째 그룹은 평균체장  $58.3 \pm 4.6$  cm, 평균체중  $320.0 \pm 82.0$  g의 뱀장어 8 개체에 대해 0%, 25%, 32%의 염분범위에서 25℃에서부터 10℃까지 0.5℃씩 수온을 14시간 단위로 내리면서 산소소비율을 측정하

였다. 각 그룹은 1 ~ 2회씩 총 21회 실시하였다.

산소소비율의 측정은 자동호흡측정기(Automatic Intermittent-Flow Respirometer: AIFR)를 이용하였다(Fig. 4). 또한 생물이 대기온도에 의해 받을 수 있는 간접적인 영향을 줄이기 위해 실험장치를 항온기(BOD Incubator: VS-1203P5N-0, Vision Scientific Co., LTD, Korea) 내부에 설치하여 지속적인 암상태(constant darkness) 하에서 측정하였다.

실험생물의 개체수는 실험장어의 경우 1회에 0.3 ℓ 용기에 5개체씩, 성장기 뱀장어(yellow eels)의 경우는 1회에 9.8 ℓ 용기에 1 개체씩 넣었다. 실험에 사용된 실험수는 멤브레인 필터(Satorius capsule filter, Sartobran pH, Satorius, Göttingen, Germany; input-pore diameter 0.2  $\mu\text{m}$  and output-pore diameter 0.07  $\mu\text{m}$ )로 여과하여 미생물과 세균을 제거하였으며, 실험용기 내의 유량은 생물의 크기에 따라 경험적으로 실험장어의 경우는 345  $\text{ml min}^{-1}$ , 성장기 뱀장어의 경우는 690  $\text{ml min}^{-1}$ 으로 조절하였다.

산소포화도는 85 ~ 95% 범위에서 실험생물이 저산소증(hypoxia)으로 인한 스트레스를 받지 않도록 하기 위해, 용존산소량이 기준치 이하로 내려가면 지속적으로 산소가 충분한 실험수를 공급하였다. 해수공급을 위한 장치로 수조내의 용존산소가 낮아지면, 마이크로 펌프(Reglo-ZS, Ismatec Sa, Wertheim, Germany)와 3방향 밸브(TX 350-1 DA-1/2, Ilyoung, Seoul, Korea)를 연결하여 자동으로 기포발생기가 설치된 15 ℓ 물통의 해수를 측정용기 내부로 공급하였다.

산소소비율의 측정은 산소센서(15  $\text{PO}_2$ , Eschweiler, Germany)와 picoammeter (M-100, Eschweiler, Kiel, Germany)에 의해 자동으로 90 초 간격으로 측정되어 컴퓨터에 저장하였다. 즉, 90초 동안 90번 감지된 자료는 컴퓨터의 계산에 의해 산술 평균되어 시간당 산소소비율( $\text{ml O}_2$

h<sup>-1</sup>)로 모니터의 그래프상에 하나의 점으로 표시하였다. 수온측정(Farnell, Pt-100, Germany)과 대기압(Sensym-Hs 20, Farnell, Germany)은 각각의 센서를 통해 측정하였고, 이에 대한 데이터의 전송은 A/D Board를 통해 전기적 신호로 전환하여 컴퓨터에 저장하였다. 그 외의 다른 데이터, 염분(‰), 실험시간(s), 대기압(hPa) 및 산소포화도(%)도 자동으로 측정되어 컴퓨터에 저장하였다.

측정 시스템내의 물 흐름을 연결하는 관은 대기로부터의 공기유입을 차단하기 위해 2 mm 두께의 튜빙(Nalgene 8000, Nalge Co., N.Y., U.S.A.)을 사용하였다. 압력(대기압  $P_{atm} = 1$  기압 = 1,013 mbar = 1,013 hPa), 수온 및 염분도에 따른 산소 포화농도,  $KO_2$  ( $ml \ell^{-1}$ )는 Weiss (1970)가 사용한 수식을 이용하였다.

$$\ln KO_2 = A_1 + A_2 (100/T) + A_3 \ln (T/100) + A_4 (T/100) + S[(B_1 + B_2 (T/100) + B_3 (T/100)^2)]$$

여기서, T는 측정시의 수온[K], S는 측정시의 염분도(‰), A와 B는 상수로서 다음과 같다.

$$A_1 = -173.4292; A_2 = 249.6339; A_3 = 143.3483; A_4 = -21.8492; B_1 = -0.033096; B_2 = 0.014259; B_3 = -0.0017000.$$

측정상태( $V_R$ )의 산소농도( $mg \ell^{-1}$ )는 표준상태( $V_{STD}$ )와의 관계로부터 추정하였다.

$$V_R = V_{STD} (1013 \text{ mbar} / P_{atm}) \times (T / 273.15 \text{ K})$$

여기서, T는 측정시의 수온,  $P_{atm}$  [hPa]은 측정시간의 대기압력을 나타낸다(Mortimer, 1983). 이에 따라  $O_2$  ( $mg \ell^{-1}$ )와  $O_2$  ( $ml \ell^{-1}$ )의 관계는 다음식(Forstner and Gnaiger 1983)에 따라 계산하였다.

$$KO_2 (mg \ell^{-1}) = KO_2 (ml \ell^{-1}) \times 1.429$$

### 3. 자료분석

측정된 산소소비율(OCR)은 KaleidaGraphy custom program (Macintosh, Synergy Software, Essex Junction, VT, U.S.A.)을 이용하여, 각 온도별 실험에 따른 평균소비율을 계산하여 2% 가중평균곡선으로 처리하여 나타냈으며, Maximum Entropy Spectral Analysis (MESA) 프로그램을 이용하여 산소소비율의 주기 및 peak값을 구하였다.

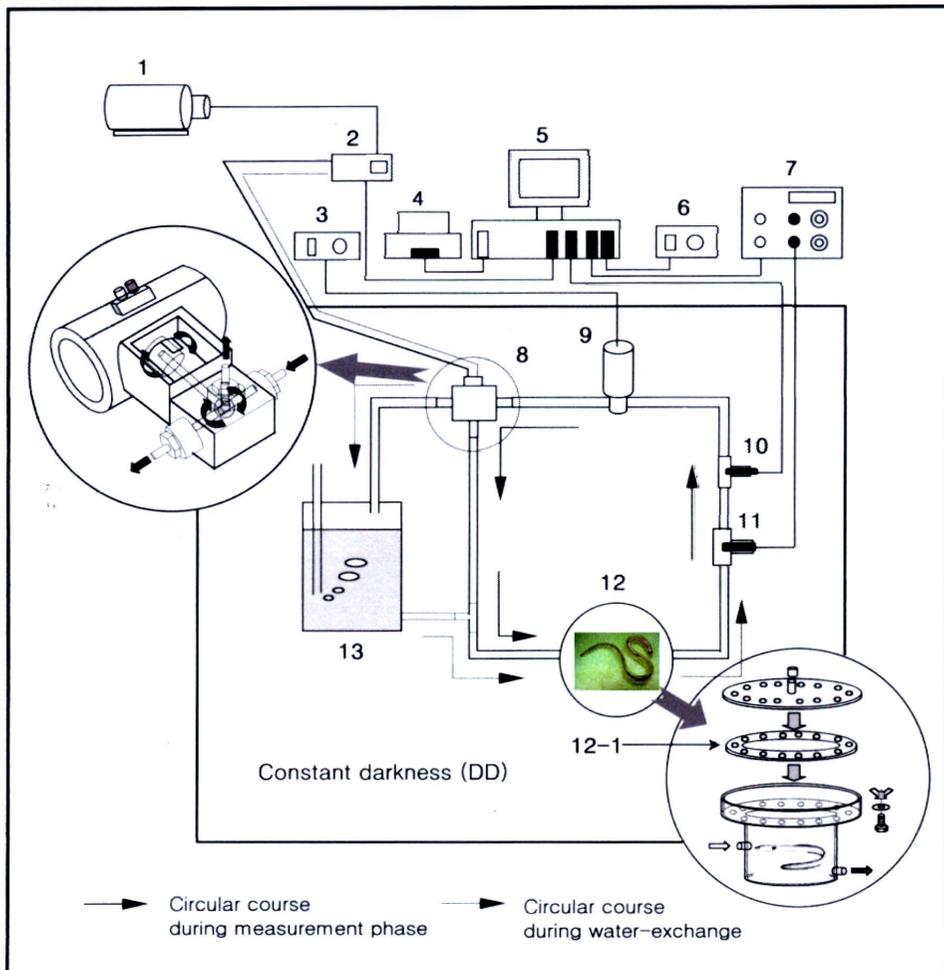


Fig. 4. Schematic of Automatic Intermittent-Flow-Respirometer (AIFR) for measuring oxygen consumption in Japanese eel, *Anguilla japonica*. 1: Air compressor; 2: Air valve controller; 3: Pump controller; 4: Printer; 5: Computer for control and data storage; 6: Air pressure sensor; 7: Picoammeter; 8: Three-way valve; 9: Tooth wheel pump; 10: Temperature sensor; 11: Oxygen sensor; 12: Test chamber; 12-1: Silicon ring; 13: Reservoir container.

### III. 결 과

#### 1. 수온변화에 대한 실뱀장어의 산소소비율

제주도 천제연 하구에서 채집된 실뱀장어 5 개체에 대해 채집환경과 유사한 조건(27.5%, 12°C)에서 일정한 수온을 유지하며 산소소비율을 측정하였다(Table 1). 총 326시간에 걸쳐 관찰된 산소소비율의 진폭은 0.01 ~ 0.48 ml O<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> WW h<sup>-1</sup>의 변화를 보였으며, 비교적 안정된 양상의 호흡리듬을 나타냈다(Fig. 5A). MESA 프로그램을 이용하여 전 실험구간에 대해 주기분석을 수행한 결과, 12.4시간의 강한 조석주기 리듬이 관찰되었으며 20.3시간의 일주기 리듬과 유사한 호흡리듬도 나타났다(Fig. 5B).

군산 금강 하구에서 채집된 실뱀장어 5 개체에 대해 13.5%, 13°C에서 일정하게 수온을 유지하면서 산소소비율을 측정하였다(Table 1). 총 267시간에 걸쳐 측정된 산소소비율은 실험 개시 2일 동안은 약간 증가하는 양상을 보이다가 점차 안정된 패턴을 나타냈다(Fig. 6A). 측정된 산소소비율의 진폭은 0.01 ~ 0.25 ml O<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> WW h<sup>-1</sup>의 변화폭을 나타냈으며, 주기분석결과 12.4시간의 조석주기 리듬과 28.3 시간의 호흡리듬이 관찰되었다(Fig. 6B).

제주도 천제연 하구에서 채집된 실뱀장어 5 개체에 대해 20.7%, 10°C에서 25°C까지 1°C씩 24시간 단위로 수온을 증가시키면서 산소소비율을 측정하였다(Table 1). 총 386시간 동안 진행된 실험에서 산소소비율의 진폭은 0.01 ~ 0.82 ml O<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> WW h<sup>-1</sup>의 변화량을 나타냈으며, 실험초기 2-3일 동안은 비교적 안정된 호흡리듬을 나타내다가 12.3°C 부근에서 점차 증가하기 시작하여 22.8°C에서 peak값을 나타낸 후 감소했다. 이 후에는 불규칙적인 리듬이 나타났다(Fig. 7A). 산소소비율의 peak값이 나타나기 전까지 실험시간에 대한 주기분석결과, 24.3시간의 일주기와 유사한 호흡리듬과 15.8시간의 호흡리듬이 관찰되었다(Fig. 7B).

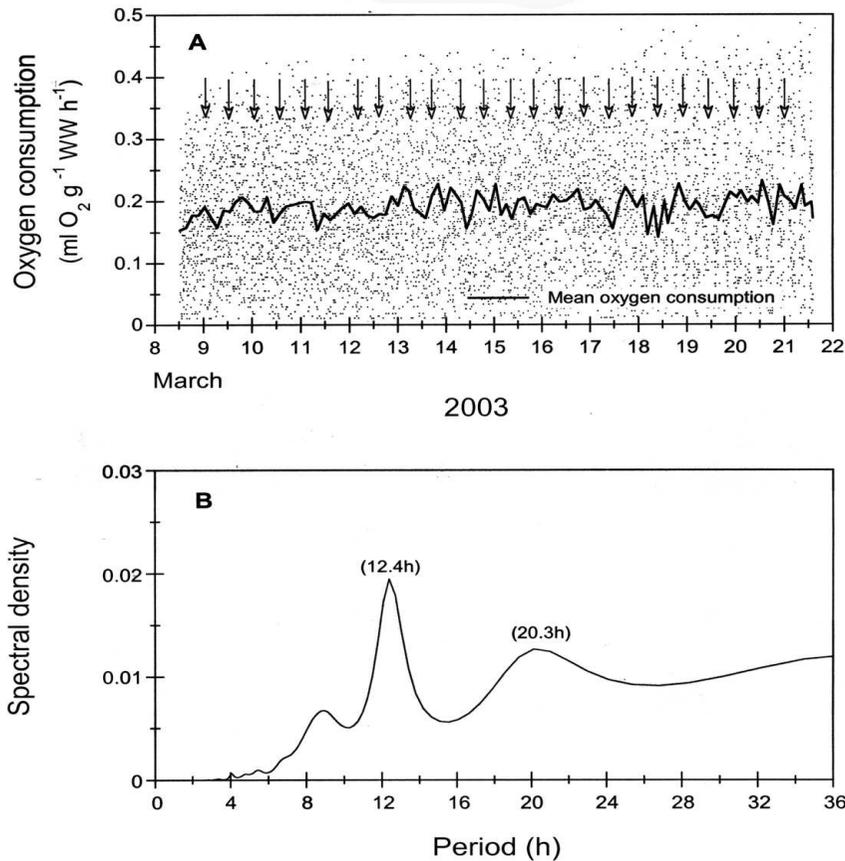


Fig. 5. **A**: Patterns of the oxygen consumption rate (OCR:  $\text{ml O}_2 \text{ g}^{-1} \text{ WW h}^{-1}$ ) by 5 fasted glass eels, *Anguilla japonica* ( $5.3 \pm 0.05$  cm,  $0.07 \pm 0.01$  g), which were subjected to constant temperature ( $12^\circ\text{C}$ ), during 326 h period at 27.5‰. **B**: Maximum entropy spectral analysis (MESA) spectra from data presented in Fig 5A. Arrows indicate scheduled times of high tide at the collection site.

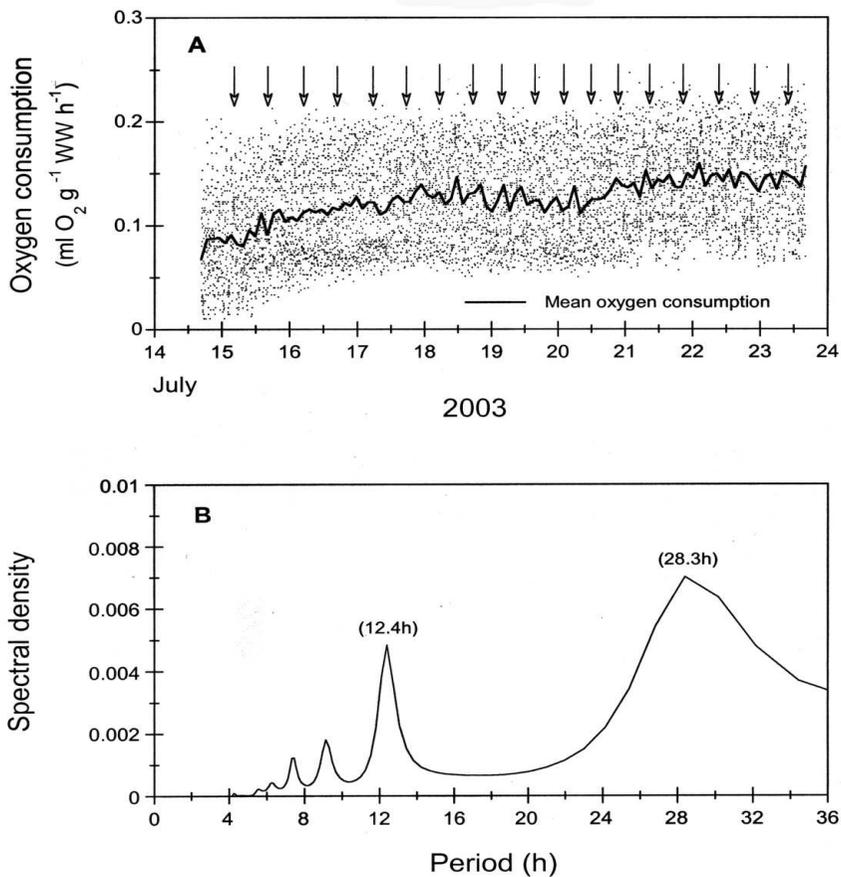


Fig. 6. **A**: Patterns of the oxygen consumption rate (OCR:  $\text{ml O}_2 \text{ g}^{-1} \text{ WW h}^{-1}$ ) by 5 fasted glass eels, *Anguilla japonica* ( $5.5 \pm 0.11$  cm,  $0.09 \pm 0.01$  g), which were subjected to constant temperature ( $13^\circ\text{C}$ ), during 267 h period at 13.5‰. **B**: Maximum entropy spectral analysis (MESA) spectra from data presented in Fig. 6**A**. Arrows indicate scheduled times of high tide at the collection site.

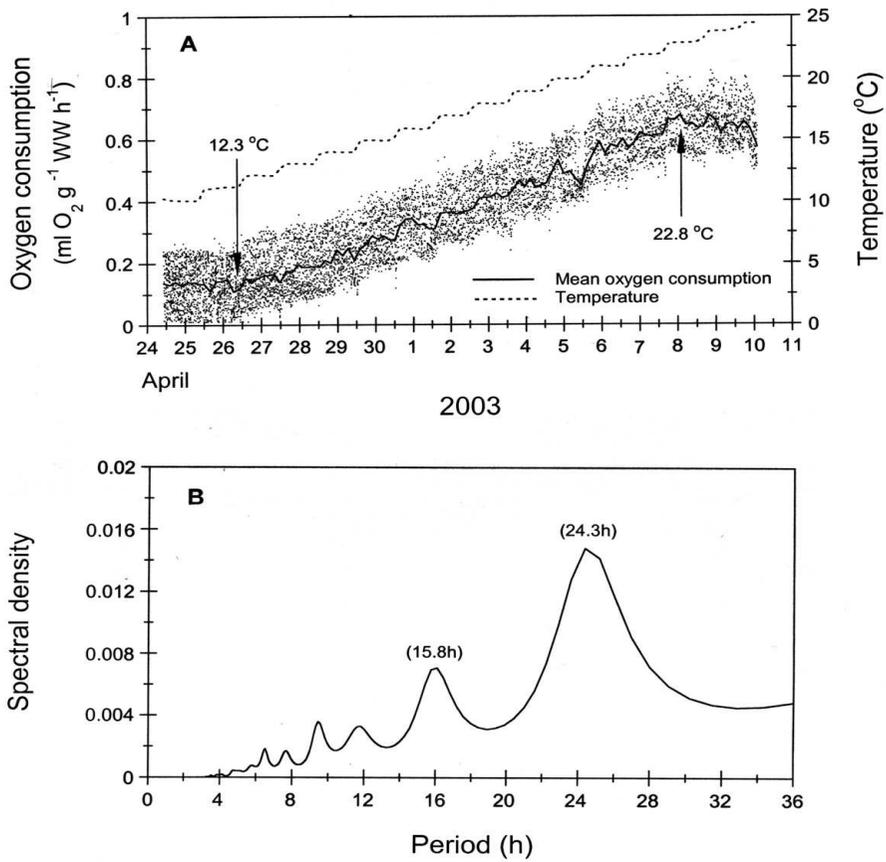


Fig. 7. **A**: Patterns of the oxygen consumption rate (OCR: ml O<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> WW h<sup>-1</sup>) by 5 fasted glass eels, *Anguilla japonica* (5.3 ± 0.25 cm, 0.09 ± 0.01 g), which were subjected to temperature increase from 10 to 25°C, during 386 h period ( $\Delta t = 1^\circ\text{C } 24 \text{ h}^{-1}$ ) at 20.7%. **B**: Maximum entropy spectral analysis (MESA) spectra from data presented in Fig. 7**A**.

## 2. 일정수온에서 성장기 뱀장어의 산소소비율

2003년 8월 14일부터 9월 2일까지 약 18.8일 동안 금강 하구에서 채집한 성장기 뱀장어에 대해 일정한 상태(0‰, 25℃)를 유지하면서 산소소비율을 측정하였다(Fig. 8A, Table 2). 측정된 산소소비율 자료를 2% 이동평균에 적용한 결과, 큰 변동이 없는 일정한 호흡리듬을 나타냈다. 비교적 안정된 호흡리듬이 나타난 구간 a에 대해 시계열 분석에 의한 주기분석을 실시한 결과, 24.0시간의 강한 일주기 리듬과 14.8 시간의 조석주기와 유사한 호흡리듬이 관찰되었다(Fig. 8B). 산소소비율의 진폭은 14.50 ~ 237.67 ml O<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> WW h<sup>-1</sup>의 최저값과 최고값을 나타냈으며, 실험개시 약 3일 동안은 산소소비율이 감소하였으며, 이후 약 4일 동안은 일정하게 유지되었다(Fig. 8A, a). 이후 약간씩 증가하는 경향을 나타내었으며, 실험개시 12일에서 13일 사이에 최대값을 나타낸 후(Fig. 8A, b), 다시 감소하였다.

2003년 9월 7일부터 20일까지 약 13일 동안 군산 만경강 하구에서 채집한 성장기 뱀장어에 대해 일정한 상태(25‰, 25℃)를 유지한 후, 산소소비율을 측정하였다(Table 2). 측정된 산소소비율 자료를 2% 이동평균에 적용하여 나타냈다(Fig. 9A). 산소소비율의 진폭범위는 13.48 ~ 170.33 ml O<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> WW h<sup>-1</sup>로 최저치와 최고치 사이에 큰 차이를 보였으며, 평균값은 153.70 ml O<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> WW h<sup>-1</sup>으로 나타났다. 전 실험시간에 대해 시계열분석을 한 결과, 산소소비율의 peak값은 실험기간동안 24.9시간의 일주기 리듬과 유사한 호흡리듬과 15.0시간의 호흡리듬이 관찰되었다(Fig. 9B).

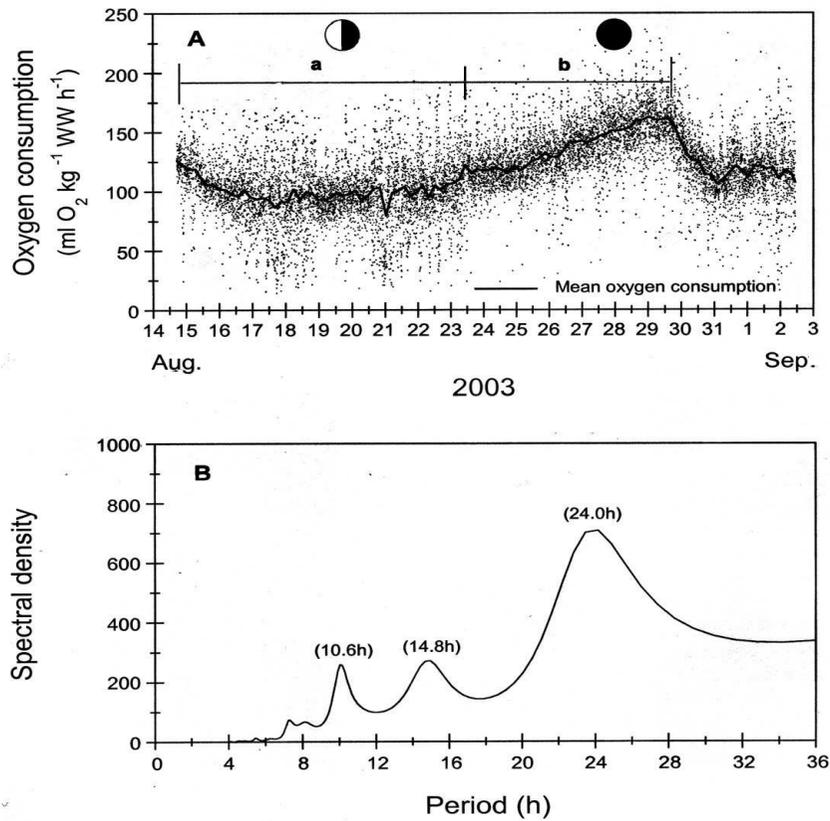


Fig. 8. **A**: Patterns of the oxygen consumption rate (OCR:  $\text{ml O}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ WW h}^{-1}$ ) by a yellow eel, *Anguilla japonica* (49 cm, 200 g), which were exposed to constant temperature at  $25^\circ\text{C}$  under 0‰. Half dark circle (☾) indicated the warning moon and dark circle (●) indicated the old moon. **B**: Maximum entropy spectral analysis (MESA) spectra from data presented in Fig. 8A-a.

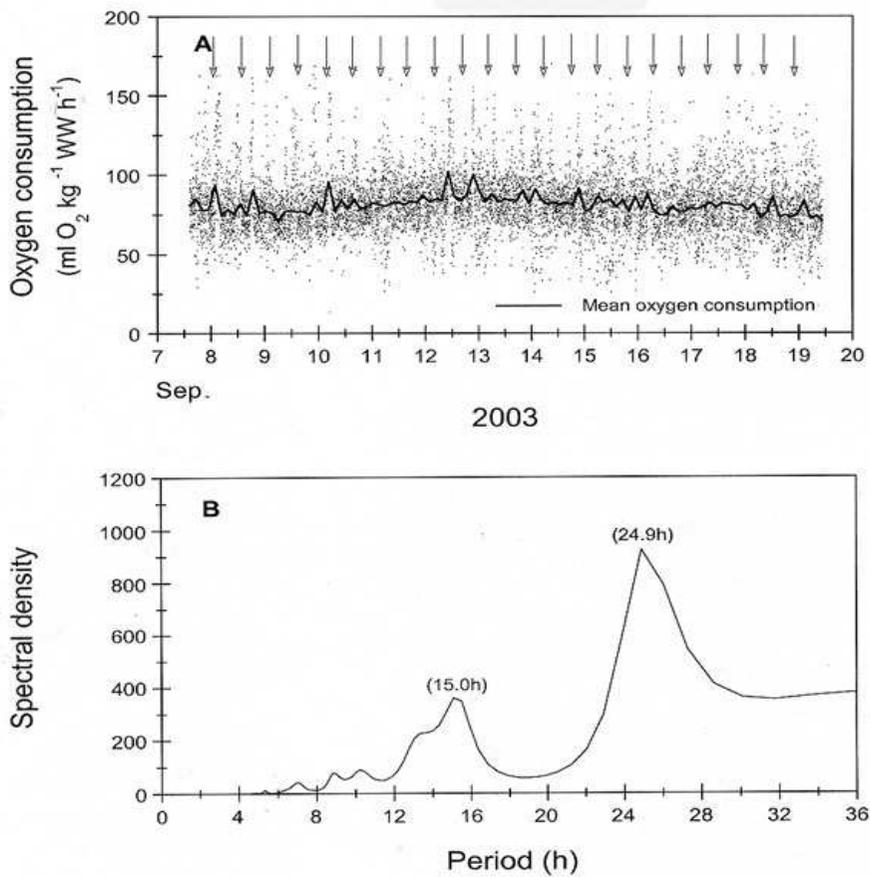


Fig. 9. **A**: Patterns of the oxygen consumption rate (OCR:  $\text{ml O}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ WW h}^{-1}$ ) by a yellow eel, *Anguilla japonica* (46 cm, 180 g), which were subjected to constant temperature at  $25^\circ\text{C}$  under 25‰. **B**: Maximum entropy spectral analysis (MESA) spectra from data presented in Fig. 9A. Arrows indicate scheduled times of high tide at the collection site.

### 3. 수온증가에 따른 성장기 뱀장어의 산소소비율

2003년 8월 14일부터 9월 3일까지 약 20일 동안에 걸쳐 담수상태(0‰)에서, 25℃에서부터 40℃까지 매 14시간마다 0.5℃씩 일정하게 수온을 증가시키면서 4회에 걸쳐 산소소비율을 측정하였다(Fig. 10A, Table 3). 467시간에 걸쳐 측정된 자료를 2% 이동평균에 적용하였으며, 산소소비율의 진폭은 20.1 ~ 336.6 ml O<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> WW h<sup>-1</sup>로 최소값과 최대값 사이에 큰 변화폭을 나타냈다. 산소소비율은 실험개시 약 10일 동안은 일정한 양상을 나타냈으며 이 후, 약간씩 증가하였다. 그러나 실험개시 17일째인 수온 37℃ 범위에서 산소소비율은 급격하게 증가하여, 38.5℃에서 최대값이 관찰되었다. 산소소비율이 급격하게 증가하기 이전인 16일 동안의 주기를 분석한 결과(Fig. 10A, a), 수온증가율과 일치되는 28.2시간의 호흡리듬이 우세하게 나타났으며, 12.5시간의 조석주기 리듬도 관찰되었다(Fig. 10B).

2003년 9월 3일부터 9월 20일까지 17일 동안에 걸쳐 염분을 25‰로 하고 성장기 뱀장어의 산소소비리듬을 관찰하였다. 수온을 25℃에서 매 14시간마다 0.5℃씩 증가시키면서 뱀장어의 산소소비율을 측정하였으며, 측정된 산소소비율을 2% 이동평균에 적용하여 나타내었다(Fig. 11A, Table 3). 총 375시간에 걸쳐 측정된 평균 산소소비율의 진폭은 21.2 ~ 417.3 ml O<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> WW h<sup>-1</sup>로 나타났다. 산소소비율은 완만하게 증가하는 양상을 보이다가 35.8℃ 부근에서 급격히 증가하여 38℃에서 최대값을 나타냈다. 산소소비율이 급격하게 증가하기 이전 12일 동안의 실험기간에 대해 시계열분석으로 산소소비율의 주기를 관찰한 결과(Fig. 11A, a), 수온증가율과 일치되는 28.2시간 주기의 호흡리듬이 우세하게 나타났으며, 10.4시간의 리듬도 관찰되었다(Fig. 11B).

2003년 9월 22일부터 10월 8일까지 약 16일 동안에 걸쳐 염분 32‰

상태에서 25℃에서부터 0.5℃씩 매 14시간마다 수온을 증가시켜 실험한 결과, 관찰된 산소소비율은 18.9 ~ 273.0 ml O<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> WW h<sup>-1</sup>의 변화폭을 나타냈다(Fig. 12A, Table 3). 뱀장어의 산소소비율은 완만하게 증가하다가 35.8℃ 부근에서 급격하게 증가하기 시작하여 38℃에서 최대값을 보인 후 감소하였다. 시계열분석으로 산소소비율이 증가하기 전 12일 동안의 실험시간에 대해 주기분석을 수행한 결과(Fig. 12A, a), 수온 증가율과 일치되는 28.6시간의 호흡리듬과 14.3시간의 리듬도 관찰되었다(Fig. 12B).

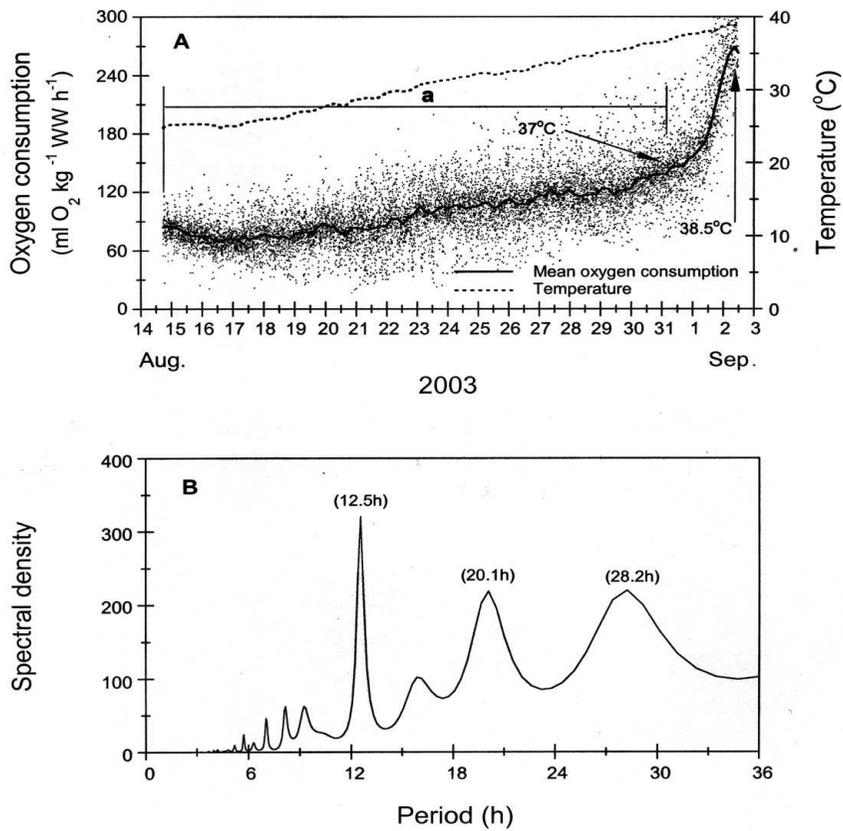


Fig. 10. **A**: Patterns of the oxygen consumption rate (OCR: ml O<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> WW h<sup>-1</sup>) by a yellow eel, *Anguilla japonica* (45 cm, 120 g), which were subjected to a temperature increase from 25 to 40°C, during 467 h period ( $\Delta t = 0.5^\circ\text{C } 14 \text{ h}^{-1}$ ) at 0‰. **B**: Maximum entropy spectral analysis (MESA) spectra from data presented in Fig. 10**A-a**.

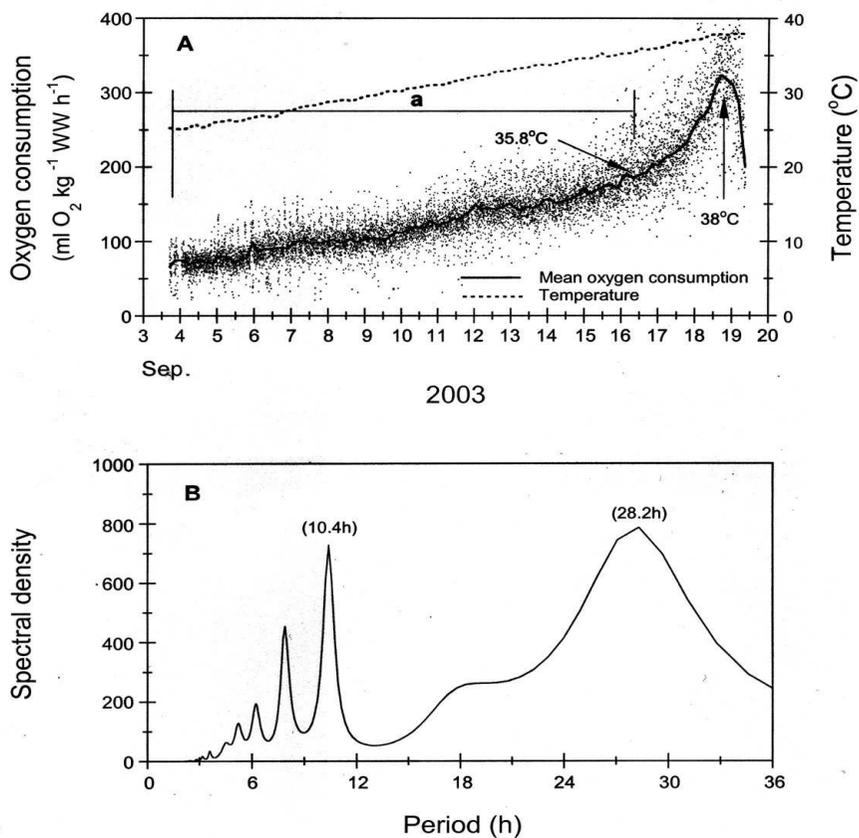


Fig. 11. **A:** Patterns of the oxygen consumption rate (OCR: ml O<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> WW h<sup>-1</sup>) by a yellow eel, *Anguilla japonica* (47 cm, 150 g), which were subjected to a temperature increase from 25 to 40°C, during 392 h period ( $\Delta t = 0.5^\circ\text{C } 14 \text{ h}^{-1}$ ) at 25%. **B:** Maximum entropy spectral analysis (MESA) spectra from data presented in Fig. 11**A-a**.

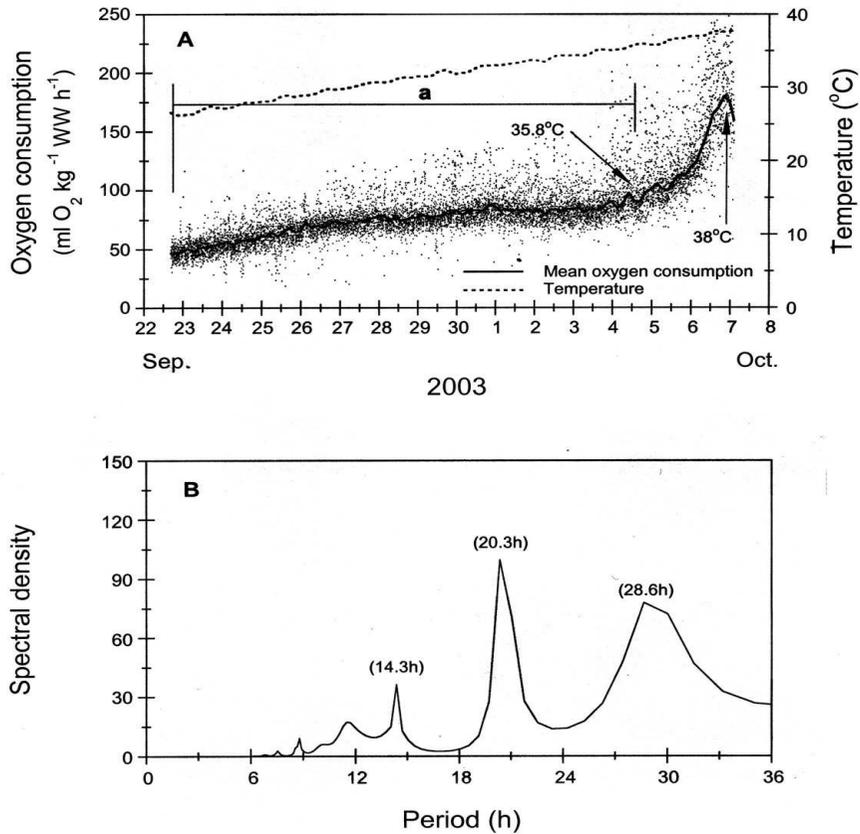


Fig. 12. **A:** Patterns of the oxygen consumption rate (OCR:  $\text{ml O}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ WW h}^{-1}$ ) by a yellow eel, *Anguilla japonica* (43 cm, 110 g), which were subjected to a temperature increase from 25 to  $40^{\circ}\text{C}$ , during 362 h period ( $\Delta t = 0.5^{\circ}\text{C } 14 \text{ h}^{-1}$ ) at 32‰. **B:** Maximum entropy spectral analysis (MESA) spectra from data presented in Fig. 12**A-a**.

#### 4. 수온감소에 따른 성장기 뱀장어의 산소소비율

2003년 8월 14일부터 9월 3일까지 20일 동안 담수환경(0%)에서 25°C부터 10°C까지 14시간마다 수온을 0.5°C씩 감소시키면서 산소소비율을 측정하였다(Fig. 13A, Table 4). 총 467시간에 걸쳐 측정된 산소소비율의 진폭은 평균 23.1 ~ 86.7 ml O<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> WW h<sup>-1</sup>의 변화폭을 나타냈다. 실험개시 2일 동안은 산소소비율이 약간 증가하는 양상을 보이다가, 감소하였다. 산소소비율의 패턴은 실험개시 5일에서 6일 사이, 22.5°C 부근의 온도에서 약간의 변화를 나타냈으며, 이 후 수온에 따라 계속 감소하였다. 산소소비율이 지속적으로 감소하기 시작한 16일 동안의 실험시간(Fig. 13A, a)에 대해 시계열분석으로 주기를 분석한 결과, 수온 감소율과 일치되는 28.7시간 주기와 15.3시간의 호흡리듬이 관찰되었다(Fig. 13B).

2003년 9월 17일부터 10월 8일까지 약 21일에 걸쳐 25%의 염분에서 14시간마다 수온을 0.5°C씩 내리면서 실험한 결과, 뱀장어의 산소소비율의 진폭은 13.9 ~ 73.7 ml O<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> WW h<sup>-1</sup>의 변화폭을 나타냈다(Table 4). 산소소비율은 실험개시 2일 동안 다소 증가하는 양상을 보이다가 이 후, 감소하였다. 산소소비 감소형태는 실험개시 4일에서 5일 사이, 20.5°C의 수온에서 약간의 변화를 나타냈다(Fig. 14A). 이 후, 수온 변화에 따라 지속적으로 감소하는 양상을 보였다. 실험초기의 증가구간을 제외한 511시간(Fig. 14A, a)에 걸쳐 산소소비율의 주기를 분석하였다. 측정된 peak값에서 수온감소율과 일치되는 28.2시간의 주기와 14.3시간의 호흡리듬이 관찰되었다(Fig. 14B).

2003년 9월 9일부터 9월 23일까지 14일 동안 32%의 염분에서 0.5°C씩 수온을 내리면서 뱀장어의 산소소비율을 측정한 결과, 69.4 ~ 228.9 ml O<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> WW h<sup>-1</sup>의 변화폭을 나타냈다(Table 4). 산소소비율은 수온

이 내려감에 따라 지속적으로 감소하는 양상을 나타냈으며, 실험개시 7일에서 8일 사이에 20.8℃의 수온에서 약간의 변화가 있었다(Fig. 15A). 총 322시간의 실험시간(Fig. 15A, a)에 대한 주기분석결과, 수온감소율과 일치되는 28.6시간의 호흡리듬이 우세하게 나타났고 11.2시간의 호흡리듬도 관찰되었다(Fig. 15B).

2003년 11월 4일부터 12월 7일까지 33일 동안 32%의 염분에서 25℃부터 0℃까지 14시간마다 수온을 0.5℃씩 감소시키면서 성장기 뱀장어의 산소소비율을 측정하였다(Fig. 16A). 총 781시간에 걸쳐 측정된 평균 산소소비율은 6.9 ~ 42.7 ml O<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> WW h<sup>-1</sup>의 변화폭을 나타냈다(Table 4). 실험개시 후, 6일에서 7일사이에 일정하게 감소하던 산소소비율이 20.8℃의 수온에서 일시적인 변화를 나타냈으며, 20일째 약 9.0℃의 수온에서부터 온도감소와 관계없이 일정한 양상을 나타냈다(Fig. 16A). 실험개시 후, 19일 동안의 실험시간(Fig. 16A-a)에 대해 주기분석을 수행한 결과, 수온감소율과 일치되는 28.5시간의 호흡리듬이 우세하게 나타났고 12.5시간의 조석주기 리듬도 관찰되었다(Fig. 16B).

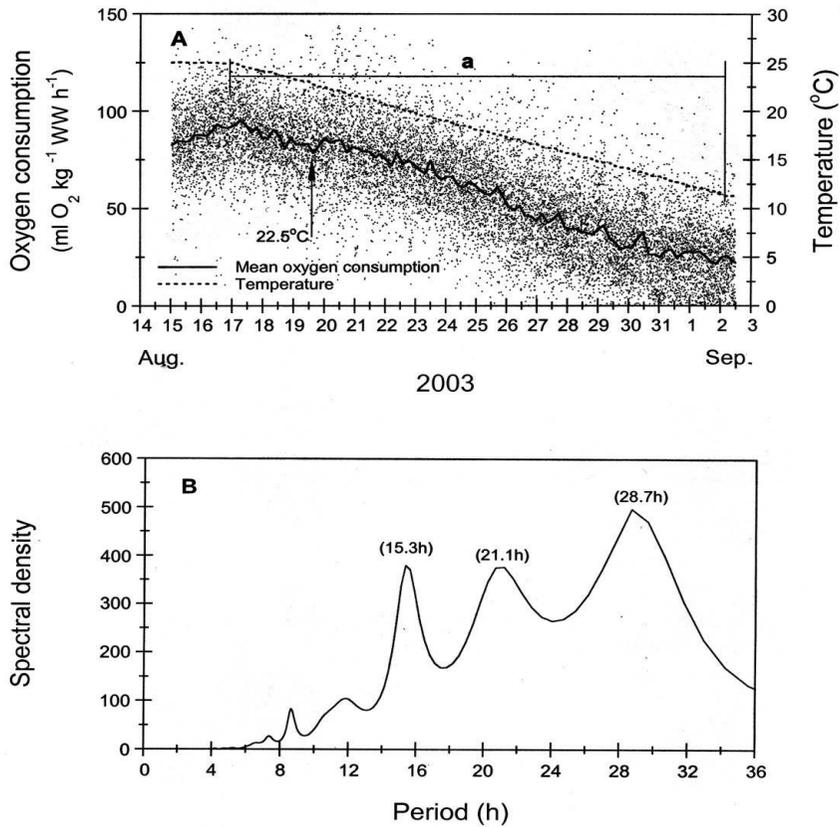


Fig. 13. **A**: Patterns of the oxygen consumption rate (OCR:  $\text{ml O}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ WW h}^{-1}$ ) by a yellow eel, *Anguilla japonica* (38 cm, 80 g), which were subjected to a temperature decrease from 25 to 10 $^{\circ}\text{C}$ , during 467 h period ( $\Delta t = 0.5^{\circ}\text{C } 14 \text{ h}^{-1}$ ) at 0%. **B**: Maximum entropy spectral analysis (MESA) spectra from data presented in Fig. 13**A**-a.

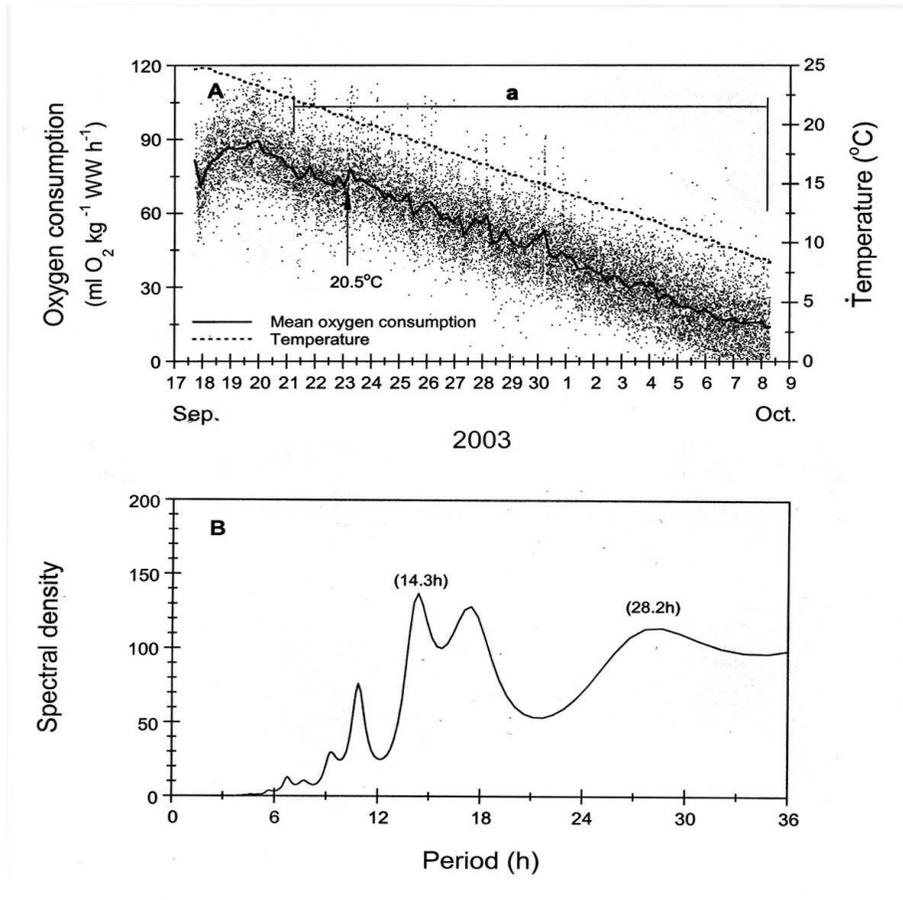


Fig. 14. **A**: Patterns of the oxygen consumption rate (OCR: ml O<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> WW h<sup>-1</sup>) by a yellow eel, *Anguilla japonica* (47 cm, 120 g), which were subjected to a temperature decrease from 25 to 10°C, during 511 h period ( $\Delta t = 0.5^\circ\text{C } 14 \text{ h}^{-1}$ ) at 25%. **B**: Maximum entropy spectral analysis (MESA) spectra from data presented in Fig. 14**A**-a.

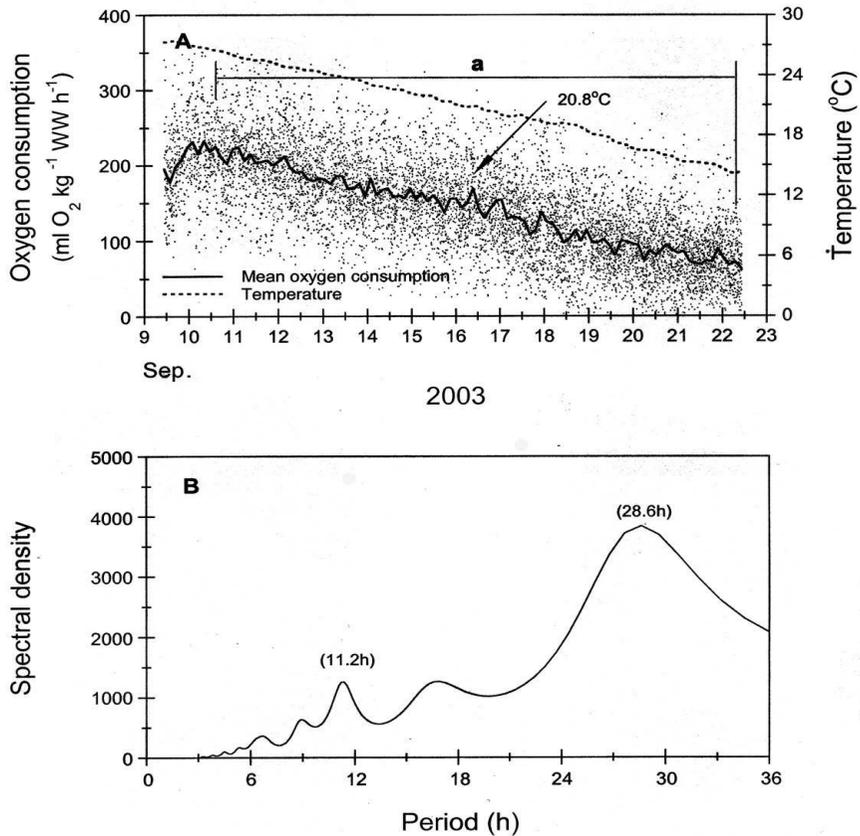


Fig. 15. **A**: Patterns of the oxygen consumption rate (OCR: ml O<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> WW h<sup>-1</sup>) by a yellow eel, *Anguilla japonica* (64 cm, 300 g), which were subjected to temperature decrease from 25 to 0°C, during 322 h period ( $\Delta t = 0.5^\circ\text{C } 14 \text{ h}^{-1}$ ) at 32‰. **B**: Maximum entropy spectral analysis (MESA) spectra from data presented in Fig. 15**A-a**.

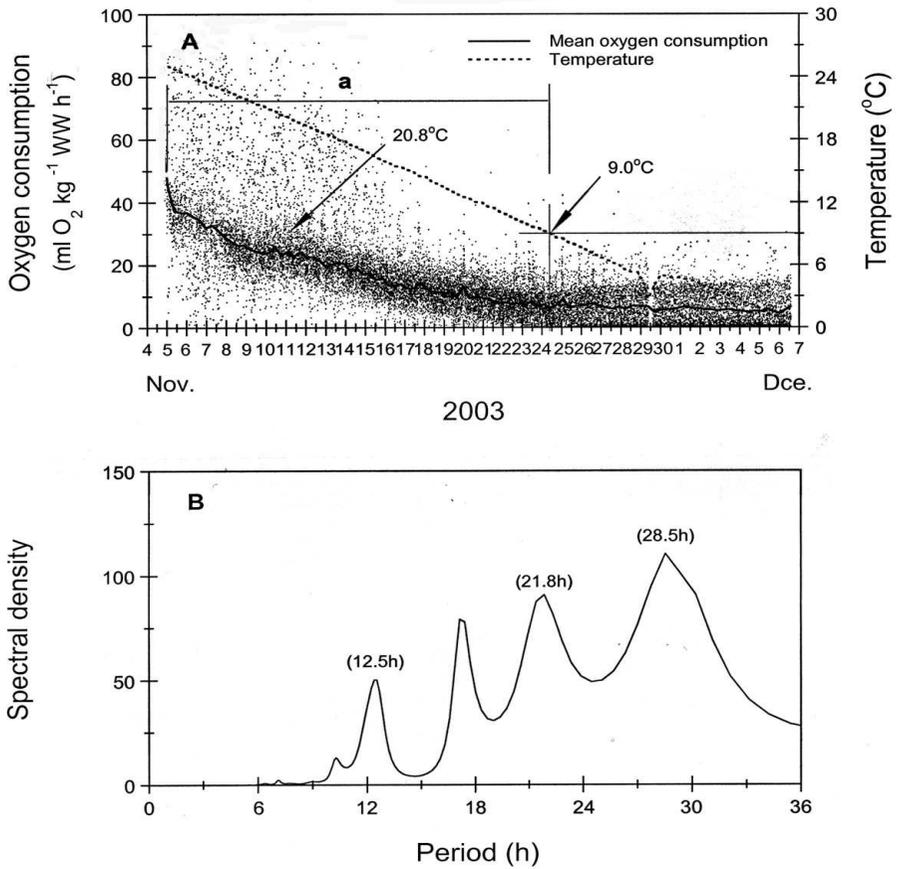


Fig. 16. **A:** Patterns of the oxygen consumption rate (OCR: ml O<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> WW h<sup>-1</sup>) by a yellow eel, *Anguilla japonica* (73 cm, 680 g), which were subjected to temperature decrease from 25 to 0°C, during 781 h period ( $\Delta t = 0.5^\circ\text{C } 14 \text{ h}^{-1}$ ) at 32‰. **B:** Maximum entropy spectral analysis (MESA) spectra from data presented in Fig. 16**A**-a.

Table 1. Experimental parameters under constant and increasing temperature of glass eels, *Anguilla japonica*. Values are mean  $\pm$  SD.

	Exposure to 27.5‰	Exposure to 13.5‰	Exposure to 20.7‰
Range of temperature (°C)	12	13.5	10~25
Oxygen saturation level (%)	85.1~95.4	85.1~94.9	85.1~94.8
Duration of experiments (h)	326	267	386
Number of experiments (N)	1	1	1
Number of individuals (n)	5	5	5
Total length (cm)	5.3 $\pm$ 0.05	5.5 $\pm$ 0.11	5.3 $\pm$ 0.25
Weight (g)	0.07 $\pm$ 0.01	0.09 $\pm$ 0.01	0.09 $\pm$ 0.01
Mean oxygen consumption (ml O <sub>2</sub> g <sup>-1</sup> WW h <sup>-1</sup> )	0.15 $\pm$ 0.19	0.12 $\pm$ 0.001	0.34 $\pm$ 0.002

Table 2. Experimental parameters under constant temperature of yellow eels, *Anguilla japonica*. Values are mean  $\pm$  SD.

	Exposure to freshwater	Exposure to 25‰
Temperature (°C)	25	25
Oxygen saturation level (%)	85.3~94.8	85.5~94.8
Duration of experiments (h)	322~466	303~394
Number of experiments (N)	2	2
Number of individuals (n)	2	2
Total length (cm)	47.0 $\pm$ 2.8	50.3 $\pm$ 6.0
Weight (g)	180.0 $\pm$ 28.3	200.0 $\pm$ 28.3
Mean oxygen consumption (ml O <sub>2</sub> kg <sup>-1</sup> WW h <sup>-1</sup> )	116.5 $\pm$ 30.2	82.2 $\pm$ 18.7

Table 3. Experimental parameters under increasing temperature of yellow eels, *Anguilla japonica*. Values are mean  $\pm$  SD.

	Exposure to freshwater	Exposure to 25‰	Exposure to 32‰
Range of temperature (°C)	25~40	25~40	25~40
Oxygen saturation level (%)	85.2~95.1	85.3~96.8	85.4~94.8
Duration of experiments (h)	449~467	276~392	362~384
Number of experiments (N)	2	2	2
Number of individuals (n)	2	2	2
Total length (cm)	43.5 $\pm$ 2.1	44.0 $\pm$ 4.2	42.0 $\pm$ 1.4
Weight (g)	130.0 $\pm$ 14.1	145.0 $\pm$ 7.1	105.0 $\pm$ 7.1
CTM (°C)	38.5	38	38
Ranges of mean oxygen consumption (ml O <sub>2</sub> kg <sup>-1</sup> WW h <sup>-1</sup> )	20.1~336.6	21.2~417.3	18.9~273.0

Table 4. Experimental parameters under decreasing temperature of yellow eels, *Anguilla japonica*. Values are mean  $\pm$  SD.

	Exposure to freshwater	Exposure to 25‰	Exposure to 32‰	Exposure to 32‰
Range of temperature (°C)	25~10	25~10	25~10	25~0
Oxygen saturation level (%)	85.2~95.1	85.2~95.1	85.1~98.3	85.1~95.7
Duration of experiments (h)	259~467	308~511	174~322	494~781
Number of experiments (N)	2	2	2	2
Number of individuals (n)	2	2	2	2
Total length (cm)	41.0 $\pm$ 4.2	50.8 $\pm$ 5.3	67.5 $\pm$ 4.9	74.0 $\pm$ 1.4
Weight (g)	110.0 $\pm$ 42.4	150.0 $\pm$ 42.4	330.0 $\pm$ 42.4	690.0 $\pm$ 14.1
Ranges of mean oxygen consumption (ml O <sub>2</sub> kg <sup>-1</sup> WW h <sup>-1</sup> )	23.1~86.7	13.9~73.7	69.4~228.9	6.9~42.7

#### IV. 토 의

모든 생물의 대사생리활성은 환경요인에 의해서 결정되는 것으로 알려져 있으며, 뱀장어의 호흡생리실험에서도 이와 같은 결론을 얻었다. 외부 환경요인의 변화에 따라 실뱀장어의 체내 대사활성도 환경변화에 적응하여 일치하는 것으로 나타났다. 실뱀장어의 내인성 생체리듬을 관찰하기 위하여 일정한 수온과 어두운 상태에서 관찰된 결과, 제주도 천제연 하구에서 채집된 실뱀장어의 경우, 12.4시간의 강한 조석주기 호흡리듬이 나타났는데, 이는 실뱀장어의 내인성 생체리듬이 채집지역의 조석주기에 적응되어 있다는 사실을 보여준다. 군산 금강 하구에서 채집한 실뱀장어의 경우, 28.3시간의 호흡리듬이 우세하게 나타났으나 실험실에 약 40일간 순치했음에도 불구하고 12.4시간의 조석주기 리듬도 함께 관찰되었다. 실뱀장어의 호흡리듬에서 28.3시간과 조석주기 리듬이 같이 나타난 이유는 아마도 실험실 환경의 영향과 자연 상태에서 본래 가지고 있던 내인성 조석주기 리듬이 함께 나타난 것으로 판단된다. 그러나, 실뱀장어가 산란장에서 산란을 하여 해류를 따라 변태과정을 거치면서 회유할 때 조석주기에 일치되었다고 볼 수 없다.

실뱀장어로 변태하기 전단계의 뱀장어는 해양 회유기 동안 일주수직운동을 하는데(Otake et al., 1994, 1998), 이 때의 체내의 생체리듬은 태양의 영향으로 24시간의 일주기에 적응된다. 이후, 강 하구에 도달한 실뱀장어는 대양에서와는 다른 환경에 노출되면서 생리적 전이를 겪게 된다. 따라서 외부환경에 적응하기 위해 실뱀장어는 기수역에서 일정기간을 머무르게 되는데, 기수환경에서 실뱀장어는 태양의 영향에 의한 일주기리듬과 달에 의한 조석주기의 영향을 함께 받는다. Wippelhauser and McCleave (1988)는 강 하구에서 채집한 실뱀장어(*A. rostrata*)에 대해 외인성 영향(exogenous influences)이 없는 일정한 상태에서 내인성

생체시계(endogenous clocks)에 의한 조석주기 행동리듬을 관찰했으며, Gibson (1976)도 가자미과 어류의 치어에 대해 일정한 조건하에서 조석주기 리듬이 관찰되었다고 보고했다. 이러한 사실로 미루어 실뱀장어는 기수환경에 머무르면서 12.4시간의 조석주기에 적응하게 되며, 이로 인해 내부생체리듬이 일주기에서 조석주기로 전환되는 것으로 생각된다.

실뱀장어에 대한 수온증가 실험에서 실험개시 2 ~ 3일 동안 산소소비율은 일정한 양상을 나타냈으나, 12.3°C에서 증가하기 시작하여 22.8°C에서 peak값을 나타냈다. 실뱀장어의 산소소비율이 12.3°C까지 비교적 안정된 경향을 보이는 것은 실뱀장어가 낮은 수온에서 머물면서 체내 에너지를 절약하는 생존방식에 기인하는 것으로 판단된다. 실뱀장어의 소상시기와 수온범위는 지역에 따라 다른 것으로 알려져 있다(Tongiorgi et al., 1986; Tosi et al., 1988; Tosi et al., 1990; Martin 1995; White and Knights, 1997). 국내의 경우도 지역에 따라 소상시기가 다르며, 수온이 낮은 5°C일 때부터 실뱀장어의 소상이 시작되어 10 ~ 13°C에서 최대로 나타난다고 알려져 있다(Lee and Kim, 2001). 제주도 천제연 하구에서 채집된 실뱀장어의 산소소비율이 12.3°C에서 증가하기 시작하는 이유는 이 수온 범위에서 실뱀장어의 소상이 활발하게 나타나기 때문으로 판단되며, 이러한 결과로 미루어 실뱀장어는 수온 변화에 매우 민감하게 반응하는 것으로 생각된다. 수온변화에 따른 호흡반응 실험에서 실뱀장어는 1°C 이하의 수온변화에도 매우 민감한 것으로 잘 알려져 있다(Lee and Kim, 2001; Kim et al., 2002). 실뱀장어의 산소소비율이 22.8°C범위를 넘게 되면 수온이 증가함에도 불구하고 감소하게 되는데 아마도 성숙 단계 과정에서 이러한 수온 범위는 체내의 생리활성에 영향을 주는 것으로 판단된다. 하구에서 강으로 소상하는 실뱀장어는 수온이 19°C 이상이 되면 더 이상 강으로 소상하지 않는 것으로 보고 되었다(Tzeng 1985).

따라서, 수온범위 22.8℃는 아마도 실뱀장어의 소상 한계수온으로 추정되며, 강으로의 소상은 이러한 한계수온 범위아래까지 이루어지는 것으로 판단된다.

일정한 수온과 어두운 상태에서 관찰된 성장기 뱀장어의 산소소비율에서 24.0 ~ 24.9시간의 일주기와 유사한 호흡리듬이 강하게 나타났으며, 조석주기 리듬과 유사한 10.6 ~ 15.0시간의 호흡리듬도 관찰되었다. 이러한 호흡리듬형태는 실뱀장어의 연구결과와 마찬가지로 기수지역에 서식하는 뱀장어도 태양의 영향에 의한 일주기뿐만 아니라 조석의 영향도 함께 받는 것으로 판단된다. 또한 20일 이상 지속된 관찰결과에서 그믐부근에서 산소소비율이 최대로 나타났는데, 이러한 사실로 미루어 뱀장어가 달주기에 영향을 받는 것으로 생각된다. 조석은 해양생물의 산란에 밀접한 영향을 주는 것으로 알려져 있으며, 이미 조간대에 서식하는 대부분의 해양생물이 그믐 혹은 보름과 같은 달주기에 맞추어 산란하는 것이 밝혀졌다(Thorpe, 1978; Palmer, 1995). 또한 이석을 분석하여 부화된 시기를 역 추적한 결과, 뱀장어도 그믐부근에 산란일이 주로 분포하는 것으로 알려졌다(Ishikawa et al., 2001; Lee et al., 2001). 따라서 그믐부근에서 뱀장어의 산소소비율이 최대로 나타난 것은 28일의 달주기가 뱀장어의 내인성 생체리듬에 영향을 미친 것으로 판단된다.

성장기 뱀장어에 대한 수온증가에 대한 반복실험 결과, 산소소비율은 수온 35.8℃에서 36℃ 부근부터 급격한 증가를 나타냈으며 산소소비리듬 형태도 불규칙하게 나타났다. 이 후, 38℃ 부근에서 최고치를 나타낸 후 급격하게 감소하였다. 산소소비리듬과 관련된 수온의 영향을 분석할 때 성장기 뱀장어에 있어서 생체리듬 관찰이 가능한 상한 수온 범위는 36℃ 정도로 판단된다. 또한, 성장기 뱀장어의 최대임계온도(Critical Thermal Maximum: CTM)는 이보다 높은 수온인 38℃ 정도에서 일어났다. CTM

은 매우 일시적인 현상일 뿐 아니라, 대상 생물이나 환경요인에 따라 달라질 수 있기 때문에 이러한 치사 수온에 대한 어류들의 반응도 매우 복잡하게 나타난다(Kim et al., 2003). Bennett and Judd (1992)는 CTM보다 약간 높은 수온상태에서 어류들이 수온에 대한 적응력과 대사활동의 평형이 상실된다고 주장한 바 있으며, Cox (1974)는 미국송어(*Lepomis macrochirus*)에 대한 CTM 실험에서 CTM이 개체의 크기와 성장단계에 따라 다르게 나타난다고 보고했다. 조피볼락(*Sebastes schlegeli*)에 대한 CTM 실험에서 체장 27 cm의 개체(29.5℃)가 21 cm의 개체(30.9℃)에 비해 1.5℃ 가량 낮은 CTM 값이 관찰되었으며, 이러한 CTM은 순치시의 수온이나 수온변화율에 따라 동종에서도 서로 다른 값을 가질 수 있다(Kim et al., 2003). 생물들이 매우 낮은 수온이나 높은 수온에 노출되면 대사활동이 증가 또는 감소되는 변화를 보이는데, 특히 어류에 있어서 이러한 극한 온도환경에 노출되면 그들의 행동(Mehner and Wieser, 1994), 유영능력(Brett, 1971), 호흡 및 삼투조절능력(Reynolds and Casterlin, 1980), 성장률(Jobling, 1988; Morgan, 1992)등이 심각한 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 그러므로 환경요인과 관련된 뱀장어의 생리활동 및 생존에 영향을 미칠 수 있는 상한온도를 밝히는 것은 실제 양식산업에 있어서 최적수온 적정에 중요한 자료를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

절식상태에서 수온감소에 따른 성장기 뱀장어의 산소소비율 측정 결과, 20.5℃와 23℃사이에서 일시적인 변동이 나타났는데, 일정하게 감소하던 산소소비율이 이 수온 부근에서 일시적으로 높은 값을 나타냈다. 이러한 이유는 뱀장어 체내의 생체리듬에 어떠한 변화가 일어났음을 의미한다. 지금까지 알려진 바로는 절식상태의 농어류(*Perca fluviatilis*)에 대한 산소소비반응 실험에서 우선적으로 에너지원으로 간과 근육에 저장

된 글리코젠을 거의 소비한 후, 다른 에너지원으로 전환 시킬때 산소소비율의 변화가 있었으며, 이때 내인성 생체리듬에도 일시적으로 변화가 있었다(Mehner and Wieser 1994). 점농어(*Lateolabrax* sp)에서도 이와 유사한 실험결과가 있으며(Kim et al., 1998), 이때패류인 바지락(*Ruditapes philipinarum*)에서도 관찰되었다(2001). 본 연구는 성장기 뱀장어의 호흡활성만 관찰하였기 때문에 체내의 생화학적 요인과 연관하여 앞으로 더 많은 실험이 요구된다.

뱀장어와 관련하여 수온 범위 20.5 ~ 23℃는 인공 종묘생산에서 중요한 의미를 지닌다. 지금까지 인공 종묘생산을 위한 친어를 이러한 수온 범위에서 사육하였다(Ghittino et al., 1975; Ohta et al., 1996). 예를 들면, 23℃의 수온에서 인공적으로 뱀장어의 유생 생산에 성공했으며, 부화된 뱀장어 유생이 22 ~ 23℃로 순치된 수조에서 변태하는 것을 관찰했다(Yamamoto and Yamauchi 1974). 이러한 결과로 미루어 20 ~ 23℃의 수온범위에서 감소하던 산소소비율에 일시적인 변화가 나타나는 것은 이 부근의 수온에서 절식상태의 뱀장어가 산란이나 체내 에너지원의 전환과 관련된 생화학적 반응을 일으키는 것으로 생각되나, 생화학적 접근법에 근거한 실험이 이루어지지 않았기 때문에 결론을 내리기 어렵다.

수온감소에 대한 반복실험 결과, 대략 9.0℃의 수온에서 수온감소와 관계없이 산소소비율이 일정한 양상을 나타냈는데, 뱀장어의 생존전략 또는 회유에 이러한 수온범위는 중요한 의미를 나타낸다고 볼 수 있다. Okamura et al. (2002)에 의하면 Mikawa 만에서 뱀장어의 채포량이 담수의 수온이 13℃ 이하로 내려가는 10월부터 증가하기 시작하여 10℃ 부근인 12월에 최대치를 보인후, 5℃ 이하로 내려가는 1월경에 급격히 감소하는 것으로 보고했다. 채포량이 최대로 나타난 12월의 해수의 수온은 대략 13 ~ 14℃ 부근으로 나타났는데, 이 수온범위에서 뱀장어가 바다

로 회유를 시작하는 것으로 추측된다. *A. japonica*의 산란장이 태평양의 관 인근지역으로 알려져(Tsukamoto, 1992) 있기 때문에 뱀장어가 산란을 위해 장거리를 회유할 때, 이 기간 동안 체내 에너지를 가장 효율적으로 사용하기 위한 수온이 요구된다. 수온범위 9.0℃부터 나타난 일정한 형태의 산소소비패턴은 아마도 대양에서 이러한 수온범위의 해류를 따라 이동하는 생존전략에 기인하는 것으로 추정된다. 앞으로 이러한 뱀장어의 체내 에너지 대사나 생화학적 반응과 관련된 수온영향에 대한 보다 심도있는 연구가 진행되어야 할 것으로 생각된다.

뱀장어의 생태에 영향을 미치는 환경요인들에 대한 조사에서 비록 과거에 수행된 일부 연구들은 수온이 뱀장어의 회유습성이나 잠재적인 주기성에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 보고한 바도 있으나(Jellyman, 1979; Sorensen and Bianchini, 1986), 현재까지의 연구결과로 미루어 볼 때, 연안 기수역에 서식하는 뱀장어의 회유습성에서는 수온이 가장 중요한 요인으로 고려되고 있다(White and Knight, 1997).

본 연구는 이러한 결과를 토대로 뱀장어 성어 및 유어의 가입 및 회유 습성과 관련된 기초적인 생태학적 자료를 토대로 행동과 관련된 환경요인과의 연관성을 규명하고자 하였으며, 이를 바탕으로 환경변화에 따른 뱀장어의 생리적 특성을 파악하여 적합한 서식환경에 대한 이해와 나아가 뱀장어 자원량 관리 및 보전에 도움이 되고자 하였다.

## V. 결 론

1. 일정한 수온과 어두운 상태에서 관찰된 실뱀장어의 산소소비율은 비교적 안정된 양상의 호흡리듬을 나타냈다. 상이한 채집지역임에도 불구하고 주기분석결과, 일주기 리듬과 유사한 호흡리듬 이외에도 공통적으로 12.4시간의 조석주기 호흡리듬이 관찰되었는데 이는 실뱀장어의 내인성 호흡리듬이 채집지역의 조석주기에 적응되어 있음을 의미한다. 실뱀장어에 대한 수온증가 실험에서 12.3℃에서 산소소비율이 증가하기 시작하여 22.8℃에서 최대로 나타났는데 이는 실뱀장어의 소상시기의 수온과 관련이 있는 것으로 생각되며, 수온 변화에 민감하게 반응한다는 것을 의미한다.
1. 일정한 수온에서 성장기 뱀장어의 산소소비율은 비교적 안정된 경향을 나타냈으며, 24.9시간의 일주기 리듬과 유사한 호흡리듬과 약한 조석주기리듬도 관찰되었다. 이는 기수역의 뱀장어가 태양에 의한 일주기와 조석의 영향을 함께 받는 것으로 판단된다. 특히 장기간 관찰된 산소소비율이 그믐부근에서 최대값을 나타내는 양상을 보여 달주기에 기인한 28일의 주기도 뱀장어의 내인성 생체리듬에 영향을 미치는 것으로 판단된다.
1. 성장기 뱀장어에 대한 수온증가 반복실험결과, 36℃에서부터 산소소비율이 급격하게 증가하여 38℃에서 최대값을 나타냈으며, 이후 호흡리듬은 급격히 감소하였다. 이러한 결과로 볼 때 뱀장어의 생체리듬 관찰이 가능한 수온은 36℃ 부근으로 판단되며, 생존에 영향을 주는 최대임계온도(Critical Thermal Maximum: CTM)은 38℃ 범위인 것으로 판단된다.

- 1 수온감소에 대한 반복실험결과, 20.5 ~ 23℃에서 일시적인 호흡리듬의 변화가 나타났으며, 수온 증가 실험과 마찬가지로 14시간 단위로 수온을 변화시킨 인위적인 수온변화주기와 일치되는 28.7시간의 호흡리듬이 관찰되었다. 특히, 장기간 관찰된 성장기 뱀장어의 산소소비율은 9.0℃ 이하의 수온범위에서 수온감소와 관계없이 일정하게 나타났다.

## 참 고 문 헌

- 문형태 (2002) 실뱀장어 이석의 미세구조와 어획자료를 이용한 뱀장어 *Anguilla japonica* 의 초기생활사. 충남대학교 박사학위논문, 75 pp
- Arai T, Limbong D, Otake T, Tsukamoto K (2000) Validation of otolith daily increments in the tropical eel *Anguilla celebesensis*. Can J Zool 78:1078-1084
- Arai T, Otake T, Tsukamoto K (1997) Drastic changes in otolith microstructure and microchemistry accompanying the onset of metamorphosis in the Japanese eel *Anguilla japonica*. Mar Ecol Prog Ser 161:17-22
- Bennett WA, Judd FW (1992) Factors affecting the low-temperature tolerance of Texas pinfish. Trans Am Fish Soc 121:659-666
- Bertin RE (1956) Eels, a biological study. Cleaver-Hume Press, London, 192 pp
- Brett JR (1971) Energetic response of salmon to temperature. A study of some thermal relations in the physiology and freshwater ecology of sockeye salmon, *O. nerka*. Am Zool 11:99-113
- Burnet AMR (1969) Migrating eels in a Canterbury River, New Zealand. New Zeal J Mar Fresh 3:230-244
- Casselman JM (2001) Dynamics of American eel, *Anguilla rostrata*, resources: Declining abundance in the 1990s. In: Aida K et al. (eds) Proc Int Symp Adv Eel Biol, September 2001. University of Tokyo, Tokyo, p 53-55
- Cox DK (1974) Effects of three heating rates on the critical thermal maximum of bluegill. In: Gibbons JW, Sharitz RR (eds) Proc Symp

- 3-5 May 1971, Augusta, Georgia. Tech Infor Cen U.S. Atom Ener Com, p 158-163
- Deelder CL (1970) Synopsis of biological data on the eel *Anguilla anguilla* (Linnaeus, 1758). FAO Fish Syn, 80:68
- Dekker W (2001) Status of the European eel stock and fisheries. Proc Int Symp Adv Eel Biol, September 2001. University of Tokyo, Tokyo, p 50-52
- Feunteun E (2002) Management and restoration of European eel population (*Anguilla anguilla*): An impossible bargain. Ecol Eng 18:575-591
- Gandolfi G, Pesaro M, Tongiorgi P (1984) Environmental factors affecting the ascent of elvers *Anguilla anguilla* (L.), into the Arno River. Oebalia 10:17-35
- Ghittino P, Glenn JS, Smith FG (1975) Studies on hormonal induction of gonadal development in American eel (*Anguilla rostrata*). Riv Ital Piscic Ittiopatol 10:75-83
- Gibson RN (1976) Comparative studies on the rhythms of juvenile flatfish. In: DeCoursey PJ (ed) Biological Rhythms in the Marine Environment. University of South Carolina Press, South Carolina, Columbia, p 199-213
- Ginoue J, Miya M, Aoyama J, Ishikawa S, Tsukamoto K, Nishida M (2001) Complete mitochondrial DNA sequence of the Japanese eel *Anguilla japonica*. Fish Sci 67:118-125
- Haro AJ (1991) Thermal preference and behavior of Atlantic eels (genus *Anguilla*) in relation to their spawning migration. Environ

- Biol Fish 31:171-184
- Hividstein NA (1985) Yield of silver eel and factors effecting downstream migration in the stream Imsa, Norway. Rep Inst Freshw Res 62:75-85
- Hiyama Y (1952) Thermotaxis of eel fry in stage of ascending river mouth. Jap J Ichthyol 2:23-30
- Ishikawa S, Suzuki K, Inagki T, Watanabe S, Kimura Y, Okamura A, Otake T, Mochioka N, Suzuki Y, Hasumoto H, Oya M, Miller MJ, Lee TW, Fricke H, Tsukamoto K (2001) Spawning time and place of the Japanese eel *Anguilla japonica* in the North Equatorial Current of the western North Pacific Ocean. Fish Sci 67:1097-1103
- Jellyman DJ (1979) Upstream migration of glass eels (*Anguilla* spp.) in the Waikato River. New Zeal J Mar Fresh 13:13-22
- Jellyman DJ, Ryan CM (1983) Seasonal migration of elvers (*Anguilla* spp.) into Lake Pounui, New Zealand, 1974-1978. New Zeal J Mar Fresh 17:1-15
- Jobling M (1988) A review of the physiological and nutritional energetics of cod, *Gadus morhua* L., with particular reference to growth under farmed conditions. Aquaculture 70:1-19
- Kawakami Y, Mochioka N, Nakazono A (1999) Immigration patterns of glass eels *Anguilla japonica* entering river in northern Kyushu, Japan. Bull Mar Sci 64:315-327
- Kim WS, Yoon SJ, Moon HT, Lee TW (2002) Effects of water temperature changes on the endogenous and exogenous rhythms of oxygen consumption in glass eels *Anguilla japonica*. Mar Ecol

Prog Ser 243:209-216

- Kim WS, Yoon SJ, Gil JW (2003) Critical Thermal Maximum (CTM) of cultured black rockfish, *Sebastes schlegeli*. J Fish Soc 6:59-65
- Lee TW, Fricke H, Tsukamoto K (2001) Spawning area and time of *Anguilla japonica*. Proc Int Symp Adv Eel Biol, September 2001. University of Tokyo, Tokyo, p 21-23
- Lee TW, Kim WS (2001) Thermal effects on respiratory activities of glass eels at different developmental stages. J Taiwan Fish Res 9:129-136
- Martin MH (1995) The effects of temperature, river flow, and tidal cycles on the onset of glass eel and elver migration into fresh water in the American eel. J Fish Biol 46:891-902
- Martin MH (1995) Validation of daily increments in otolith of *Anguilla rostrata* (Lesueur) elvers. Can J Zool 73:208-211
- Mehner T, Wieser W (1994) Energetics and metabolic correlates of starvation in juvenile perch (*Perca fluviatilis*). J Fish Biol 45:325-333
- Morgan MJ (1992) Low temperature tolerance of American plaice in relation to declines in abundance. Trans Am Fish Soc 121:399-402
- Ohta H, Kagawa H, Tanaka H, Okuzawa K, Hirose K (1996) Milt production in the Japanese eel, *Anguilla japonica* induced by reported injections of human chorionic gonadotropin. Fish Sci 62:44-49
- Okamura A, Yamada Y, Tanaka S, Horie N, Utoh T, Mikawa N, Akazawa A, Oka PH (2002) Atmospheric depression as the final

- trigger for the seaward migration of the Japanese eel, *Anguilla japonica*. Mar Ecol Prog Ser 234:281-288
- Otake T, Inagaki T, Hasumoto H, Mochioka N, Tsukamoto K (1998) Diel vertical distribution of *Anguilla japonica* leptocephali. Ichthyol Res 45:208-211
- Otake T, Ishii T, Nakahara M, Nakamura R (1994) Drastic changes in otolith strontium/calcium ratios in leptocephali and glass eels of Japanese eel, *Anguilla japonica*. Mar Ecol Prog Ser 112:189-193
- Pursiainen M, Tulonen J (1986) Eel escapement from small forest lakes. Vie Milieu 36:287-290
- Reynolds WW, Casterlin ME (1980) The role of temperature in the environmental physiology of fishes. In: Ali MA (ed) Plenum Press, New York, p 497-518
- Schmidt J (1922) The breeding places of the eel. Phill Trans Roy Soc Lond B 211:179-208
- Sorensen PW, Bianchini M (1986) Origins of the freshwater migration of elvers of the American eel in a Rhode Island brook. Trans Am Fish Soc 115:258-268
- Tatsukawa K (2001) Eel resources in East Asia. In: Aida K et al. (ed) Proc Int Symp Adv Eel Biol, September 2001. University of Tokyo, Tokyo, p 59-61
- Thrope JE (1978) Rhythmic activity of fishes. Academic Press, London, 312 pp
- Todd PR (1981) Timing and periodicity of migrating New Zealand freshwater eels (*Anguilla spp.*). New Zeal J Mar Fresh 15:225-235

- Tongiorgi P, Tosi L, Balsamo M (1986) Thermal preferences in upstream migration glass eels of *Anguilla anguilla* (L.). J Fish Biol 28:501-510
- Tosi T, Sala L, Sola C, Spampanato A, Tongiorgi P (1988) Experimental analysis of the thermal and salinity preferences of glass eels, *Anguilla japonica* (L.), before and during the upstream migration. J Fish Biol 33:721-733
- Tosi T, Spampanato A, Sola C, Tongiorgi P (1990) Relation of water odour, salinity and temperature to ascent of glass eels, *Anguilla japonica* (L.): a laboratory study. J Fish Biol 36:327-340
- 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, Arai T (2001) Facultative catadromy of the eel *Anguilla japonica* between freshwater and seawater habitats. Mar Ecol Prog Ser 220:265-276
- Tzeng WN (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 47-48:11-28
- 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 and Schlegel eelers from the estuaries of Taiwan with reference to unit stock and larval migration. J Fish Biol 40:845-857
- Tzeng WN, Severin KP, Wickstrom H (1997) Use of otolith microchemistry to investigate the environmental history of European eel *Anguilla anguilla*. Mar Ecol Prog Ser 149:73-81
- Tzeng WN, Shiao JC, Yamada Y, Oka HP (2002) Life history patterns of Japanese eel *Anguilla japonica* in Mikawa Bay, Japan. Am Fish Soc Sym, 20 pp
- Westin L, Nyman L (1979) Activities, orientation and migration of Baltic eel (*Anguilla anguilla* L.). Rapp P-V Reun Cons Int Explor Mer 174:115-123
- Westin L (2003) Migration failure in stocked eels *Anguilla anguilla*. Mar Ecol Prog Ser 254:307-311
- White ME, Knights B (1997) Environmental factors affecting migration of the European eel in the Rivers Severn and Avon, England. J Fish Biol 50:1104-1116
- Wieser W (1991) Limitations of energy acquisition and energy use in small poikilotherms: evolutionary implications. Funct Ecol 5:234-240
- Wippelhauser GS, McCleave JD (1988) Rhythmic activity of migrating juvenile American eels, *Anguilla rostrata*. J Mar Biol Ass U K 68:81-91
- Yamamoto K, Yamauchi K (1974) Sexual maturation of Japanese eel and production of eel larvae in the aquarium. Nature 251:220-222
- Yamamoto T, Mochioka N, Nakazono A (2001) Seasonal occurrence of

anguillid glass eels at Yakushima Island, Japan. Fish Sci  
67:530-532

## 감사의 글

첫 눈이 내렸습니다. 긴 겨울의 시작을 알리는 전주곡과 같은 눈이었지만, 이번 겨울은 웬지 추울 것만 같지는 않습니다. 비록 부족한 점이 많지만 긴 방황을 끝내며 이루어낸 작은 결실을 보면서 세상은 열심히 살아야 할 충분한 이유가 있음을 절감하게 됩니다.

먼저, 해양학이라는 넓은 학문의 바다에서 등대와 나침반이 되어주신 노 일 교수님께 진심으로 감사드립니다. 부족함이 너무나도 많은 제가 논문을 완성할 수 있도록 물심양면으로 보살펴주신 김 완수 박사님께 진심으로 머리숙여 감사드립니다. 논문심사를 위해 세심한 배려와 충고를 아끼지 않으신 박 인석 교수님과 이 태원 교수님께도 진심으로 감사드립니다.

대학원 시절부터 든든한 버팀목이 되어 주시고 인생의 선배로서 조언과 도움을 아끼지 않으신 윤 성진 선배님과 연구소 생활에서 많은 충고와 격려를 보내주신 강 정훈 선배님께 감사의 마음을 전합니다. 그리고 언제나 미소와 깊은 이해심으로 많은 실험과 자료정리를 도와준 실험실의 유승욱 씨에게도 고마움을 전합니다. 연구소 관사에서 동고동락하며 함께 한 친구 병철, 창준 그리고 후배 은표, 은석, 승훈, 재웅에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 시료채집에 많은 도움을 준 충남대 해양학과 여러 선, 후배님들께도 감사의 마음을 전합니다.

그리고 언제나 옆에서 넓은 이해심과 사랑으로 함께 해 준 성은이에게 이 논문이 작은 기쁨이 되길 바랍니다. 부족한 형을 항상 격려해주며 힘이 되어준 동생 종윤이, 그리고 무엇보다 제가 이 자리에 있을 수 있도록 한결같은 마음으로 지켜보며 채근하고 격려해주신 사랑하는 부모님께 이 논문을 바칩니다.

결코 끝나지도 끝낼수도 없는 학문에 장도앞에서 끝은 시작의 또다른 이름이라는 말을 되뇌어보며 더 나은 연구와 학문적 완성을 위해 박차를 가하리라 다짐해 봅니다.