

# 수온변화에 따른 무지개송어 (*Oncorhynchus mykiss*)의 산소소비, 아가미 호흡수 및 헤모글로빈 변화

소상영 · 허준욱<sup>1</sup> · 이정열<sup>1,\*</sup>

전라북도내수면개발시험장, <sup>1</sup>군산대학교 해양생명과학부

**Variation of Oxygen Consumption, Operculum Movement Number and Hemoglobin by Water Temperature Change in Rainbow Trout *Oncorhynchus mykiss* by Sang-Young So, Jun Wook Hur<sup>1</sup> and Jeong-Yeol Lee<sup>1,\*</sup>** (Jeollabukdo Inland Water Fisheries Experiment Station, Wanju 565-862, Korea; <sup>1</sup>School of Marine Life Science, Kunsan National University, Gunsan 573-701, Korea)

**ABSTRACT** The objective of this investigation was to examine oxygen consumption (OC) and operculum movement number (OMN) of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* as a function of changes in water temperature (WT). The WT of the rearing facility was increased from 4°C to 28°C stepwise at 1°C day at each WT (5, 10, 15, 17, 20, 23, 26, and 28°C) then OC and OMN were measured. The OC of the fish increased linearly with WT:  $O=25.0240 WT+17.5400$  in the range of 4~23°C. However, at 26 and 28°C the OC declined to around the level at 10°C. The OMN also increased linearly with temperature:  $OMN=4.4847 WT+59.2150$  in the range of 4~23°C but at 26 and 28°C the OMN of the fish dropped slightly. The OC and OMN of the fish showed peak at 23°C with the lowest values at 4°C. In the range of 4~23°C, the relationship between OC and OMN of the fish was expressed as a linear equation:  $OC=0.0923 OMN-308.2100$ . The OC of fish transferred from 15°C to certain temperatures without acclimation showed a lower OC at 5 and 10°C but above 15°C the OC increased/decreased with temperature. The trout died in temperatures above 28°C even when acclimated step by step with a 1°C day increase in WT. In this experiment, a negative physiological changes occurred in the experimental fish at 23°C suggesting that the optimal physiological temperature range of rainbow trout is 10~20°C.

**Key words :** Rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*, oxygen consumption, operculum movement number

## 서 론

일반적으로 어류들은 그들만의 최적 생활 수온을 가지고 있는데 (Shamseldin *et al.*, 1997), 어류가 최적 생활 수온 범위를 벗어나면 온도에 보상하려는 현상을 보이게 되고, 임계수준을 넘어서면 어체의 생리활성을 떨어뜨림으로써 건강을 악화시킬 수 있다 (Barton and Iwama, 1991). 특히 외부로부터 스트레스를 자주 받게 되면 어체는 항상성 (homeostasis)을 유지하기 어렵게 되며, 이를 극복하기 위하여 많은 에너지를 요구하게 된다. 그래서 성장과 생명유지

에 사용되어야 할 에너지가 필요 이상으로 소모됨으로써, 성장의 둔화 및 폐사를 가져 온다 (Schreck, 1982; Barton and Iwama, 1991).

용존산소는 어류가 살아가는 데 필수적인 요소이며 어류 양식의 생산량을 좌우하는 매우 중요한 요인이며 (Erez, 1990; Itazawa and Hanyu, 1991), 또한 수용밀도를 결정하거나 (Kawamoto, 1977), 활어수송 (Wi and Chang, 1976) 및 사료요구량을 산정 (Buentello *et al.*, 2000)하는 데 변수가 되고 있다.

어류의 산소소비와 아가미 호흡수는 수온 (Brett and Glass, 1973), 염분 (Forsberg, 1994), 광주기 (Withey and Saunders, 1973), 어류의 크기 (Brett and Glass, 1973), 사료공급량 (Brett

\*교신저자: 이정열 Tel: 82-63-469-1834, Fax: 82-63-464-6416, E-mail: yjeong@kunsan.ac.kr

and Groves, 1979) 및 스트레스(Barton and Iwama, 1991) 등 여러 가지 요인에 의해 변화되는 것으로 알려지고 있다.

무지개송어, *Oncorhynchus mykiss*는 서식 가능 수온이 5~23°C, 최적수온은 16~18°C라고 하나(이, 1990), 겨울철에는 4°C에서 여름철에는 30°C의 호소에서도 사는 것을 볼 수 있고, 또 순차적으로 길들이면 상당히 높은 온도에서도 견딜 수 있다고 알려져 있다(김, 2000). 그러나 적정수온을 벗어나면 성장이 불량해지고 과도한 온도 변화는 어류에 스트레스를 줌으로서 성장 불량 및 질병발생을 가져올 수 있기 때문에 수온 변화에 따른 대사율의 변화 경향을 파악하여 무지개송어 사육시 적정 사육 온도 및 온도 변화 폭을 구명할 필요가 있다.

본 연구에서는 무지개송어의 서식수온 변화에 따른 생리적 반응의 단기적 지표로서 산소소비량과 호흡수, 혈액내 헤모글로빈(hemoglobin) 양을 측정하여 수온 변화에 대한 적응 및 저항성 정도를 구명하여 무지개송어 양식의 기초 자료로 활용하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 실험어류 및 실험조건

실험에 사용한 무지개송어(체장 17.1±1.0 cm, 체중 68.4±2.0 g)는 전라북도 완주군 고산면 소재 송어양식장에서 구득하여 군산대학교 양어장으로 가져와 15°C의 유수식 사육수조에서 2주간 순치시킨 후 실험에 사용하였다.

실험은 순환여과 시스템을 이용한 FRP 수조(0.5 ton)에 30미를 수용하고 2반복으로 설정하였다. 사육기간 중 먹이는 시판용 무지개송어 사료를 아침(07:00)과 저녁(18:00)에 공급 하였으며, 수질의 변화를 최소화하기 위하여 남은 먹이와 찌꺼기는 매일 사이폰으로 제거하였고, 3일마다 수질을 검사하여 수질이 급격히 나빠지지 않도록 관리하였다. 실험기간 동안 pH는 7.1~8.0, 용존산소 6.1~7.4 mg/L, 총암모니아성 질소는 0.012~0.036 mg/L, 아질산염은 0.001~0.011 mg/L이었다.

### 2. 산소소비율과 아가미 호흡수 조사

수온에 따른 무지개송어의 일반적 산소소비 경향을 조사하기 위하여 15°C에서 사육하던 송어를 하루에 1°C씩 변화시켜 낮은 온도 쪽(10, 7, 6, 5 및 4°C)과 높은 온도 쪽(17, 20, 23, 26 및 28°C)에 각각 7일간 순치시킨 후 무지개송어의 산소소비율을 측정하였다. 다음에 온도 순화에 대한 실험은 둘로 나누어 진행하였는데 첫 번째 실험은 무지개송어의 온도에 대한 내성을 알아보기 위하여 사육수온을 순차적으로 변화시켜 폐사가 일어나는 상한온도와 하한온도

를 조사하였으며, 두 번째 실험은 정상온도 15°C를 중심으로 무지개송어를 낮은 온도 구간인 10°C와 5°C 및 높은 온도 구간인 20, 23 및 26°C에서 각각 사육하면서 낮은 온도 구간에서는 5, 10, 15°C 및 20°C로, 높은 온도구간에서는 5, 10, 15, 20, 23°C 및 26°C로 급격히 온도를 변화시켰을 때 산소소비율을 조사하여 온도 변화에 대한 순화능력을 조사하였다. 수온의 설정은 히터와 냉각기로 각 설정온도의 ±1°C 이내로 조절하였다.

산소소비량 측정은 산소전극(YSI-58)이 연결되어 있는 자체 제작한 호흡용기(50×20×20 cm)에 미공 여과(0.8 μm)시킨 환경수를 넣고 각 설정 온도에서 무지개송어를 수용하여 실험어가 안정될 때까지 약 15분간 호흡실로 신선한 환경수가 흐르도록 한 후, 3방향 콕크를 돌려 호흡실내 환경수가 산소전극을 거쳐 호흡실내로 다시 흐르도록 하여 소정의 시간 동안 용존산소량을 측정하였다. 측정된 용존산소량은 Jobling의 공식(1982)을 변형시킨 다음의 식(이와 김, 2005)으로 산소소비율을 계산하였다.

$$O_2 \text{ mg/g/h} = \frac{(C1 - C2) \times V}{t \times W}$$

C1 : 실험 시작시 용존산소량, mg/L

C2 : 실험 종료시 용존산소량, mg/L

V : 호흡실내 환경수 용량, L

t : 방치시간, hour

W : 실험동물의 체중, g

아가미 호흡수 측정은 호흡실내에서 1개체 당 1분 동안의 아가미 개폐수를 측정하였다. 호흡수는 실험수조 당 3마리씩 무작위로 추출하여 각 개체 당 5회씩 측정하였다.

### 3. 헤모글로빈 함량 분석

실험어에 대한 채혈은 온도 실험이 끝난 다음 각 실험 그룹별로 3마리씩 실험어를 무작위 추출하여 미부 정맥의 혈관에서 혈액응고 방지제인 헤파린(20 IU/mL/Choongwae Co., Korea)을 처리한 3 mL (23 G) 플라스틱 주사기로 채혈하여 마이크로튜브에 분주한 후 정량에 사용하였다. 헤모글로빈 함량은 시안메타헤모글로빈법(박과 오, 2001)으로 발색시켜 분광비색계(Varian Cary 1C)로 550 nm에서 비색 측정하였다.

### 4. 통계분석

각 실험에서 얻어진 자료 값 사이의 유의차 유무는 SPSS-통계 패키지(SPSS 10.1, SPSS Inc., Chicago, USA)에 의한 ANOVA 및 Duncan's multiple range test로 검정하였다.

## 결 과

### 1. 수온에 따른 산소소비율 및 호흡수의 변화

각 온도 별 산소소비량을 조사하기 위하여 15°C에서 사육하던 무지개송어를 낮은 온도(10, 7, 6, 5 및 4°C)와 높은 온도(17, 20, 23, 26 및 28°C)에 순차적으로 옮겨 7일간 순치시킨 후 무지개송어의 산소소비율과 호흡수를 조사한 결과는 Fig. 1과 같다. 일반적으로 수온에 따라 산소소비율도 높아지는 경향을 보였는데 4~7°C, 10~20°C, 23~28°C로 크게 3그룹으로 나눌 수 있다. 즉, 수온 4~7°C에서는 74.5~188.6 O<sub>2</sub> µg/g/h를 보여 가장 낮은 산소소비율을 보였으며, 10~20°C에서는 343.4~436.5 O<sub>2</sub> µg/g/h, 그리고 23°C에서는 655.8 O<sub>2</sub> µg/g/h의 가장 높은 산소소비율을 나타냈으며 26°C 이상에서는 급격히 낮은 산소소비율을 나타내었다. 7°C 이하와 23°C에서의 산소소비율은 무지개송어의 일반적 사육수온 15°C때 산소소비율에 비하여 유의한 산소소비율을 보였다( $P < 0.05$ ).

각 수온별 호흡수의 변화는 산소소비율 변화에서와 같이 4~23°C 구간에서 수온이 상승하면 호흡수 역시 증가하는 경향을 보였으나, 26°C 이상에서는 감소하는 경향을 보였다.

### 2. 온도 순화에 따른 산소소비율 및 호흡수의 변화

낮은 온도 구간인 5, 10 및 15°C에서 각각 사육하던 무지개송어를 순화온도 5, 10, 15°C 및 20°C로 갑자기 옮겼을 때 산소소비율과 호흡수 변화를 보면 Fig. 2에 나타난 바와 같다. 사육온도 5°C의 경우, 순화온도 10, 15°C 및 20°C의 산소소비율은 사육온도 5°C때 산소소비율(152.7 O<sub>2</sub> µg/g/h) 보다 유의적으로 높은 산소소비율을 보였다( $P < 0.05$ ). 그러나 사육온도 10°C의 경우, 사육온도 10°C의 산소소비율 343.6 O<sub>2</sub> µg/g/h에 비하여 순화온도 15°C 및 20°C는 높은 산소소비율을 보였으나( $P < 0.05$ ) 순화온도 5°C에서는 약간 낮은 산소소비율을 나타내었다. 사육온도 15°C의 경우, 15°C에서 396.7 O<sub>2</sub> µg/g/h를 보이던 것이 순화온도 5°C에서는 1,359.7 O<sub>2</sub> µg/g/h로 약 3.4배, 그리고 순화온도 10°C에서는 881.1 O<sub>2</sub> µg/g/h로 약 2.2배 높은 산소소비율을 보여 유의적인 증가를 보였으나( $P < 0.05$ ), 순화온도 20°C에서는 472.6 O<sub>2</sub> µg/g/h로 사육온도 15°C때보다 약간 높은 산소소비율을 보였을 뿐이었다.

호흡수 변화는 사육온도 5°C의 경우, 5°C에서 75회/분을 보이던 것이 순화온도 10~20°C에서 수온의 상승에 따라 호흡수에 증가를 보였다( $P < 0.05$ ). 사육온도 10°C에서는 10°C때 114회/분이던 것이 낮은 순화온도인 5°C에서는 77회/분으로 유의적으로 낮았고 높은 순화온도인 20°C에서는

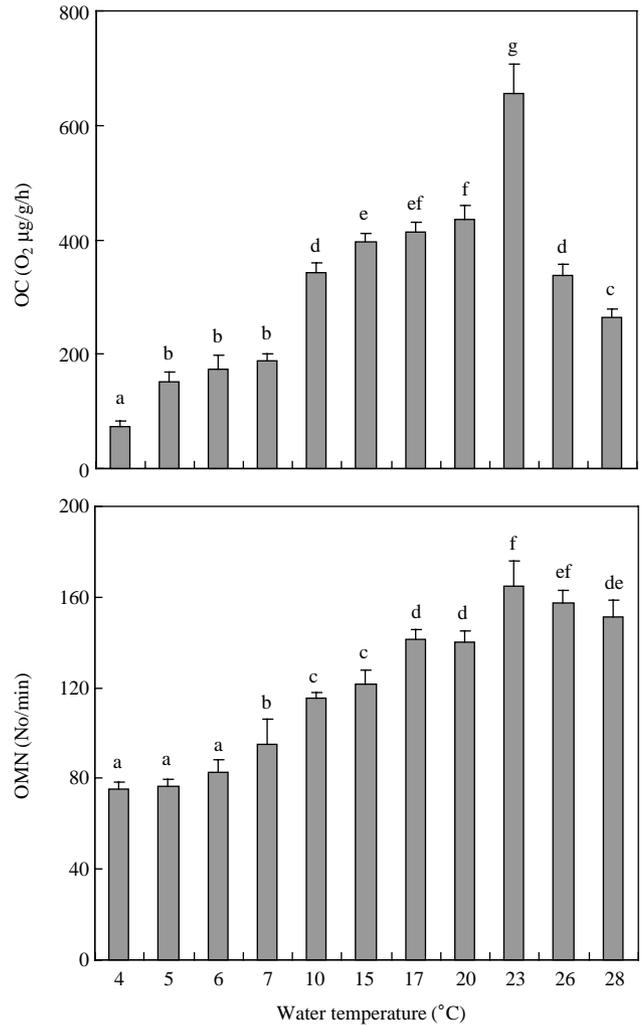


Fig. 1. Oxygen consumption (OC) and operculum movement number (OMN) of rainbow trout by each water temperature. Values are means of experiments run on two occasions ( $\pm$ SD,  $n=3$ ). Same alphabetic letters on the bars are not significantly different (Duncan's multiple range test  $P > 0.05$ ).

146회/분으로 호흡수가 유의적으로 증가하였다( $P < 0.05$ ). 전반적으로는 수온에 따라 호흡수가 증가하는 경향을 보였다. 사육온도 15°C의 경우, 순화온도 5°C의 낮은 온도에서는 146회/분로 높은 호흡수를 보였고 높은 순화온도인 20°C에서는 77회/분으로 현저히 낮은 호흡수를 보여( $P < 0.05$ ), 전체적으로는 사육온도 5°C 및 10°C때와는 달리 수온증가에 따라 호흡수가 감소하는 경향을 보였다.

한편, 높은 온도 구간인 20, 23°C 및 26°C에서 사육하던 무지개송어를 갑자기 5, 10, 15, 20, 23°C 및 26°C로 옮겼을 때 산소소비율과 호흡수 변화를 보면 Fig. 3에 나타난 바와 같다. 먼저 사육온도 20°C의 경우, 20°C때 산소소비율(436.5 O<sub>2</sub> µg/g/h)에 비하여 낮은 순화온도 구간(5, 10 및 15°C) 및 높은 순화온도 구간(23 및 26°C) 모두 낮은 산소소비율을

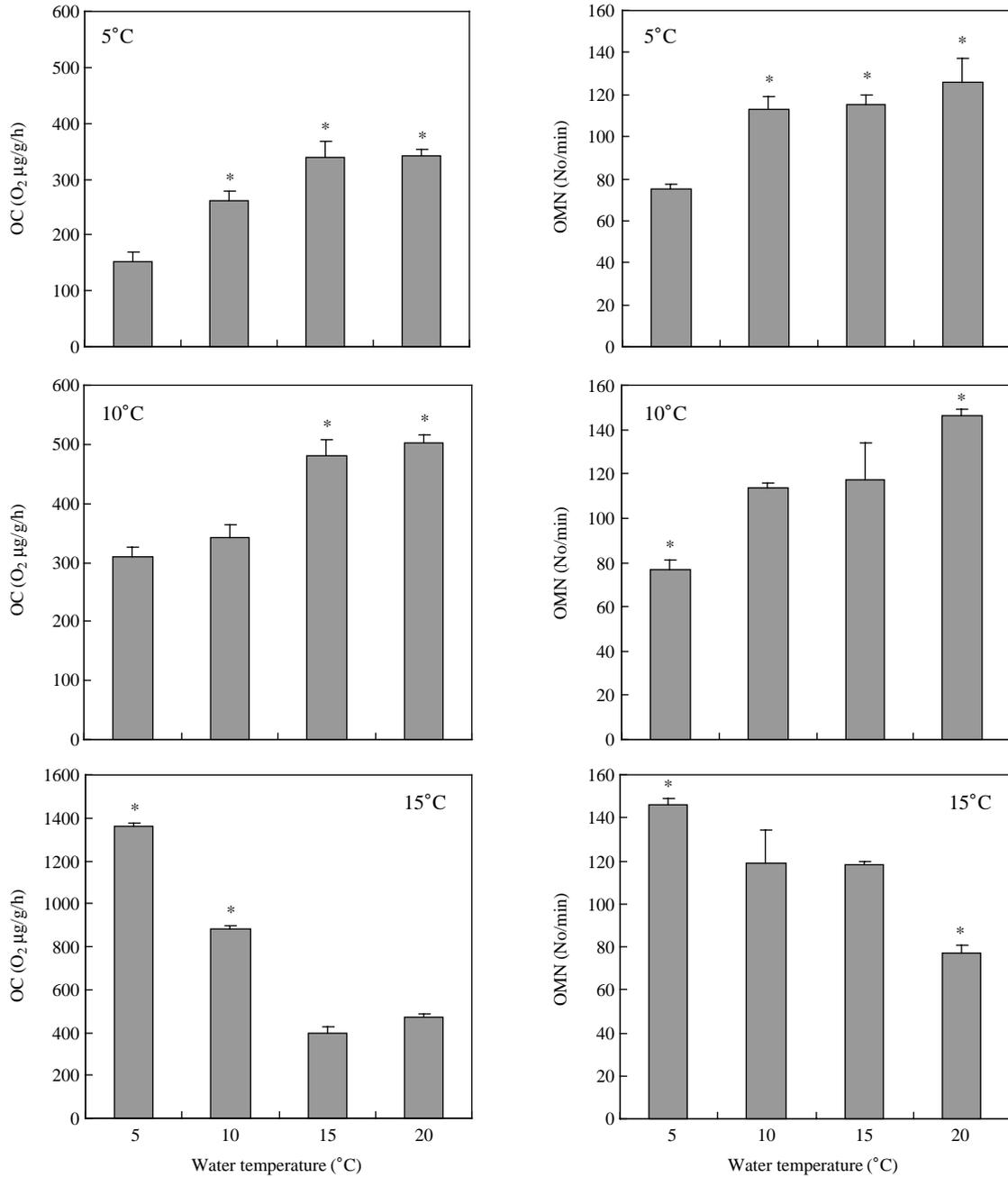


Fig. 2. Oxygen consumption (OC) and operculum movement number (OMN) of rainbow trout which were acclimated at 5, 10 and 15°C and transferred rapidly to each temperature of 5, 10, 15 and 20°C. Values are means of experiments run on two occasions ( $\pm$ SD,  $n=3$ ). Asterisk means significantly different (Duncan's multiple range test  $P < 0.05$ ).

보였는데, 저온인 5~15°C 구간과 26°C에서 유의적이었다. 사육온도 23°C는 23°C때의 산소소비율이 655.8 O<sub>2</sub> μg/g/h로 가장 높은 산소소비율을 보인 반면 낮은 순화온도 구간(5, 10, 15 및 20°C) 및 높은 순화온도(26°C) 모두 23°C때보다 현저히 낮은 산소소비율을 보여 유의적이었다( $P < 0.05$ ). 사육온도 26°C인 경우, 낮은 순화온도 구간인 5, 10, 15°C에서 26°C때의 산소소비율 337.8 O<sub>2</sub> μg/g/h에 비하여

유의적으로 낮은 산소소비율을 보였다( $P < 0.05$ ).

호흡수 변화를 보면 사육온도 20°C의 경우 20°C때의 호흡수(140회/분)에 비하여 낮은 순화온도 구간(5, 10 및 15°C)은 낮은 호흡수를, 높은 순화온도 구간(23 및 26°C)은 높은 호흡수를 보여 전체적으로 수온상승에 따라 호흡수가 상승하였으나 5°C와 10°C에서만 유의적이었다( $P < 0.05$ ). 사육온도 23°C는 23°C때의 호흡수가 163회/분으로 가장

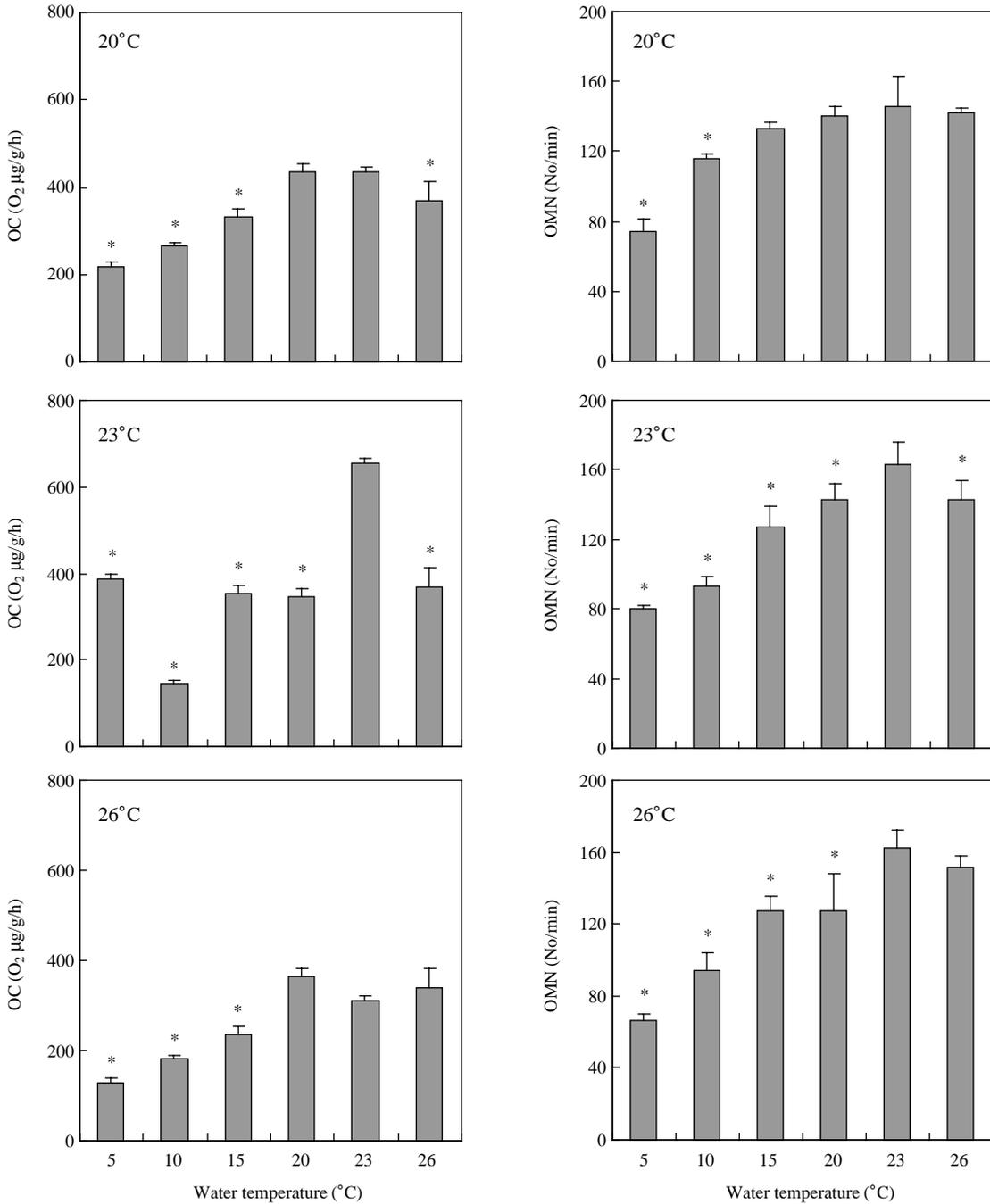


Fig. 3. Oxygen consumption (OC) and operculum movement number (OMN) of rainbow trout which were acclimated at 17, 20, 23 and 26°C and transferred rapidly to each temperature of 5, 10, 15, 20, 23 and 26°C. Values are means of experiments run on two occasions ( $\pm$ SD,  $n=3$ ). Asterisk means significantly different (Duncan's multiple range test  $P < 0.05$ ).

높은 호흡수를 보여 낮은 순화온도(5, 10, 15, 20°C) 및 높은 순화온도(26°C) 모두 23°C때보다 낮은 호흡수를 보였다( $P < 0.05$ ). 사육온도 26°C인 경우, 낮은 순화온도 구간인 5, 10, 15 및 20°C에서 26°C의 호흡수 152회/분에 비하여 낮은 호흡수를 보였으나( $P < 0.05$ ), 23°C에서는 26°C때보다 약간 높은 호흡수를 나타내었다.

### 3. 수온에 따른 산소소비율과 호흡수와의 상관관계

수온과 산소소비율 및 호흡수와의 관계는 각각 직선식으로 표시되었는데 (Fig. 4), 수온과 산소소비율과의 관계식은  $OC=25.0240 WT+17.5400$  ( $r^2=0.9281$ ), 그리고 수온과 1분간의 호흡수와의 관계식은  $OMN=4.4847 WT+59.2150$

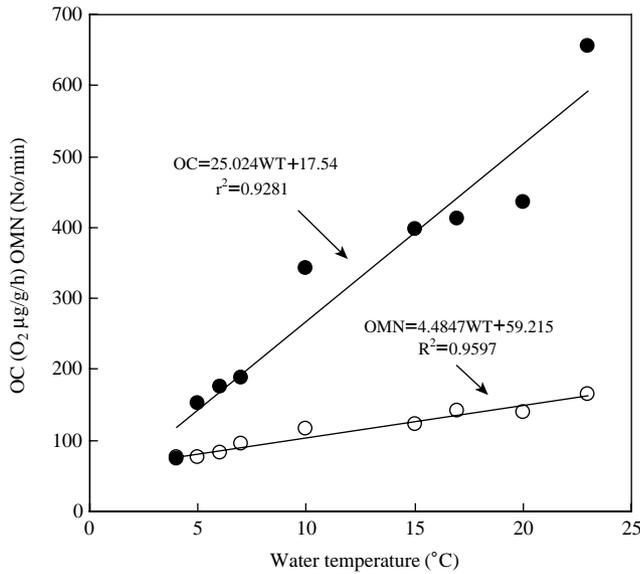


Fig. 4. Relationship between the water temperature and oxygen consumption (OC) and operculum movement number (OMN).

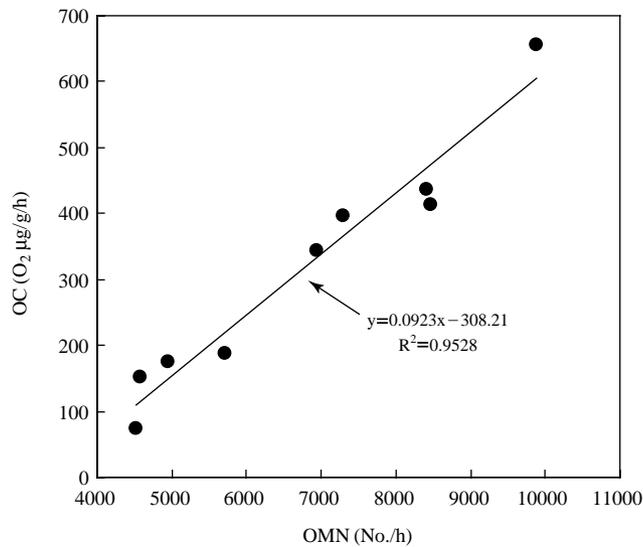


Fig. 5. Relationship between the operculum movement number (OMN) and oxygen consumption (OC).

( $r^2=0.9597$ )로 각각 나타낼 수 있었다. 한편, 호흡수와 산소 소비량과의 상관관계도 직선식으로 나타나서  $OC=0.0923 OMN-308.2100$  ( $r^2=0.9528$ )로 표시되었다(Fig. 5).

#### 4. 수온에 따른 헤모글로빈 함량과 생존율 변화

수온 4~28°C에서 23°C까지 수온이 증가할수록 무지개송어의 헤모글로빈 함량은 증가하였고, 26°C와 28°C로 수온이 상승하면 오히려 헤모글로빈의 양은 감소하는 것으로

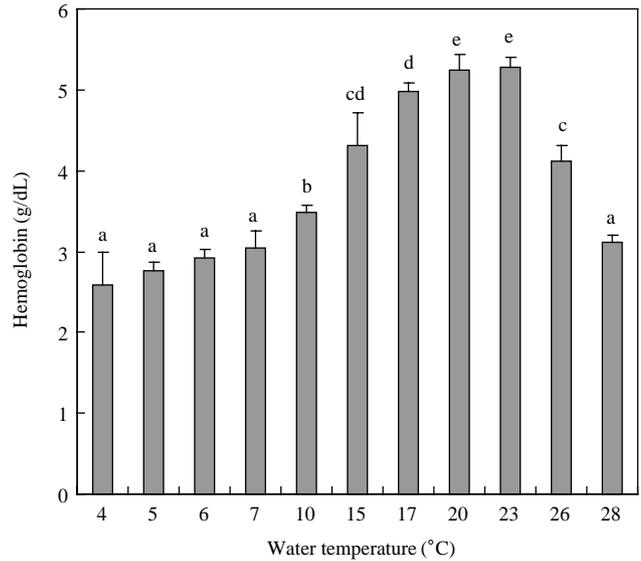


Fig. 6. Hemoglobin content in blood of rainbow trout by each water temperature. Values are means of experiments run on two occasions ( $\pm$ SD,  $n=3$ ). Same alphabetic letters on the bars are not significantly different (Duncan's multiple range test  $P>0.05$ ).

조사되었다(Fig. 6).

그리고 무지개송어의 온도에 대한 내성을 보면 수온 15°C에서 사육하던 무지개송어를 하루 1°C씩 하강하였을 때 2°C까지 낮은 수온 쪽에서는 폐사개체가 나타나지 않았다. 그러나 높은 수온 쪽으로 하루 1°C씩 상승시켰을 때 26°C까지는 폐사개체가 나타나지 않았으나, 27°C부터 폐사개체가 나타나기 시작하여 28°C에서는 90% 이상이 폐사하였으며, 29°C에서는 전량 폐사하였다.

## 고 찰

일반적으로 환경요인 중에서 온도는 어류와 같은 변온동물에 다양한 영향을 미치는데, 환경조건이 달라지면 변화된 조건에서 그들의 대사작용은 그 환경에 적응하기 위하여 재조정하는 경우를 보인다. 이렇게 변화된 환경에 대해 재조정하는 것을 보상작용 또는 순화작용이라 하며, 동물에 있어 서식환경에 대한 적응성 정도를 규정하는 것으로 수서동물에서 흔히 볼 수 있는 현상이다(Brett, 1970; Prosser, 1973; Hazel, 1993).

어류의 산소소비율 측정은 어류의 총체적 생리지표로서 흔히 이용되기 때문에 여러 환경 요인이 어류의 산소소비량에 미치는 영향을 파악하기 위해 많은 연구가 보고되고 있다(Kim *et al.*, 1995; Via *et al.*, 1998; Carlson and Parsons, 2003; Chang *et al.*, 2005; Witeska *et al.*, 2006; Zakes *et al.*, 2006). 어류는 변온성 동물로 환경온도에 적응성이 크지만

중 특이적으로 생활사 단계별로 내성수온과 최적 성장 수온이 존재하는 것으로 알려져 있다. 온도에 대한 내성은 생물들에 있어서 변화하는 환경조건에 광범위하게 적응하려는 현상으로 적응의 한계점으로 알려져 있다 (Prosser, 1973; Shamseldin *et al.*, 1997).

본 연구에서 무지개송어를 정상적인 사육수온에서 각각의 설정수온으로 옮겼을 경우, 정상수온과 수온차가 커질수록 어류의 이상행동이 관찰되었다. 사육수온 15°C를 중심으로 낮은 온도 쪽으로 갈수록 10°C까지 어류의 유영속도는 빨라지는 것으로 나타났으며, 5°C에서는 운동성이 둔화되는 것으로 나타났다. 그러나 수온이 높은 쪽으로 옮겼을 때에는 처음 유영행동은 낮은 온도 쪽과 유사하였으나, 시간이 지날수록 유영 능력이 급격히 저하되는 것이 관찰되었다. 또한 낮은 수온 쪽으로 갈수록 체표의 반문이 뚜렷해졌다. 그러나 높은 수온 쪽으로 옮겼을 경우에는 체표의 반문은 뚜렷하지 않았으며 체표에 점액분비가 많아지는 것이 관찰되었다. 이와 동시에 아가미 개폐운동이 시간이 지날수록 빨라지는 것으로 나타났다. 이와 같은 현상은 어류가 스트레스를 받았을 때 나타나는 1차적인 현상이며, 스트레스에 대한 경고 반응 (stage of alarm reaction)으로 (Schreck and Moyle, 1990), 이와 비슷한 현상이 넙치, *Paralichthys olivaceus*에서 보고된 바 있다 (허, 2002).

수온에 따른 무지개송어의 산소소비의 경향은 많은 변온성 동물에서와 같이 수온 상승에 따라 산소소비율이 증가되는 경향을 보여 주었다. 어류와 같이 수중에서 생활하는 동물의 산소소비에 가장 많은 영향을 미치는 것이 수온이며, 일반적으로 수온이 상승하면 산소소비율이 증가한다 (Xie and Sun, 1990; Via *et al.*, 1998; Chang *et al.*, 2005).

자연에 서식하는 어류의 경우 수온이 갑작스럽게 변화하여 생리적 대사활동에 위협을 받을 때는 다른 서식환경으로 도피 또는 이주를 할 수 있겠으나, 양식장의 어류는 제한된 공간에서 사육됨으로 도피 행동이 어렵기 때문에 새로운 환경에 적응하지 않으면 안된다. 수온과 용존산소량은 양식어류의 성장과 생산량을 결정하는 데 매우 중요한 요인이다 (Itazawa and Hanyu, 1991). 어류양식에서는 생활수온 범위내에서 수온이 높을수록 그리고 용존산소량이 많을수록 어류의 성장과 생산량이 많으므로 이를 잘 활용하는 것이 중요하다. 본 연구에서도 4~23°C 범위에서 수온 상승에 비례하여 산소소비율이 증가함을 보여 변온동물의 일반적인 산소소비량 경향 (Prosser, 1973)과 잘 부합하고 있는 것으로 나타났다. 한편, 수온 23°C 이상에서 무지개송어는 여러 측정 항목에서 부적응 상태를 나타내었는데 무지개송어는 수온이 23°C 이상이 되면 체내 에너지 대사에 많은 어려움이 있는 것으로 보여진다. 일반적으로 무지개송어는 5~23°C가 생활수온 범위로, 그리고 16~18°C가 최적수온으로 알려져 있다 (이, 1990). 본 연구에서도 23°C 이하에서

수온이 높을수록 산소소비율이 높아지는 결과를 보여 이를 뒷받침해 주는 것으로 나타났다. 수온이 23°C 이상 높아지면 대사의 리듬이 깨지면서 오히려 대사에 부작용이 나타나는데, 본 연구에서도 산소소비량과 혈액 헤모글로빈 함량이 감소하는 것으로 나타났다. 김 (2000)은 무지개송어가 25°C 이상이 되면 몸이 쇠약해져 죽는다고 하였다. 본 연구에서 순차적으로 온도를 상승시킨 무지개송어의 경우 수온 28°C 이상에서 모두 폐사함으로써 장기적으로는 25°C 이상 그리고 단기적으로는 28°C 이상의 수온에 무지개송어가 노출될 때는 폐사한다고 할 수 있다.

최근 우리나라의 경우 기후변화가 빈번하게 발생하여 여름철 수온이 25°C 이상까지도 상승할 수 있어 유수량이 많지 않은 무지개송어 양식장에서는 수온이 23°C 이상 고온이 예상될 때에는 사육 밀도와 사료 공급량 등을 조절하여 사육하여야 할 것으로 판단된다. Bergheim *et al.* (1998)은 산소소비량에 따른 용존산소량을 적절하게 유지하는 것이 순환여과 사육시스템 및 여러 양식 조건에서 사육 밀도와 환경 수용량을 조절할 수 있고, 어류의 생산력을 조절하여 생물학적 및 경제적으로도 중요한 요인이 된다고 하였다. 따라서 산소소비량의 증가 유무는 어체의 대사량을 측정하는 지표가 될 수 있어 이를 잘 응용하면 성장, 생존 및 질병 감염 등에 많은 정보를 제공될 것으로 판단된다.

무지개송어를 5°C와 10°C의 사육온도에서 각기 다른 순화온도로 옮겼을 경우 온도에 따라 산소소비량이나 호흡수가 높아지는 경향을 보였으나 사육온도 15°C의 경우는 순화온도에 따라 산소소비량과 호흡수 모두 감소하는 경향을 나타내어 5°C나 10°C의 낮은 온도 구간과는 다른 양상을 나타내었다. 이는 특이한 현상으로 무지개송어가 15°C의 온도에서 가장 안정적인 생리적 상태를 나타내고 있던 것이 급격히 낮은 온도에서 재조절을 나타내지 못하고 수온변화의 충격이 크게 나타나는 데서 오는 것이 아닌가 생각된다. 어류에서 산소소비가 크게 나타나는 것은 두 가지 경우로, 첫째는 생물이 환경에 적합하여 생리활성이 좋은 조건에서 높은 산소소비를 나타내는 경우이고, 둘째는 좋지 못한 환경에 처해질 때 이를 극복하기 위하여 단기적으로 높아지는 경우이다 (이와 허, 2004; 이와 김, 2005). 그리고 정상적인 사육수온 15°C를 중심으로 낮은 온도구간이나 높은 온도구간 모두 15°C때보다 낮은 산소소비량 및 호흡수를 나타내는 것을 보아서 15°C 전후를 수온의 생리적 변곡점으로 생각해 볼 수 있다.

아가미 호흡수와 혈액 헤모글로빈의 변화도 산소소비와 비슷한 경향을 나타내는 것으로 나타났다. Rodrigues *et al.* (1989)은 산소소비 감소는 헤모글로빈의 감소에 기인한다고 보고하였다. 또한 헤모글로빈의 감소는 호흡수 감소를 가져온다고 하였다. 본 연구에서 이와 유사하게 산소소비의 증가에 따른 호흡수의 증가와 헤모글로빈의 증가는 일련의

과정으로 보아진다. 즉, 아가미 호흡수에 따른 산소소비량도 직선식으로 증가되는 것으로 나타나 Rodrigues *et al.* (1989)의 연구와 유사하였으며, 수온이 상승하면 에너지를 많이 요구하는 것으로 나타났다.

혈액학적 측면에서 볼 때 23°C 이상에서 헤모글로빈의 감소는 앞서 언급한 산소소비와 연관된 결과라고 볼 수 있다. 혈액의 헤모글로빈 함량의 감소는 무지개송어가 수온상승에 따라 산소수급에 문제가 있음을 암시해 준다. 헤모글로빈의 감소는 호흡률을 감소시키며, 생체내 산소수급에 문제를 발생시켜 에너지 동원에 문제가 생긴다고 하였다(Perry and Reid, 1993). 만약 무지개송어가 23°C 이상의 수온에서 항상성 유지를 위한 에너지 수급에 문제가 없다면 성장적수온일 때의 수준으로 헤모글로빈을 유지시켰을 것으로 생각된다. 따라서 본 연구결과는 무지개송어에서 대사생리에 안정적이면서 좋은 성장을 가져오는 생활수온은 10~20°C 범위라고 판단되며, 26°C 이상의 고수온이 되면 폐사의 우려가 큰 것으로 나타났다.

## 요 약

무지개송어(체장 17.1±1.0 cm, 체중 68.4±2.0 g)의 수온 변화에 따른 생리적 반응의 단기적 지표로서 산소소비율, 호흡수, 헤모글로빈 함량 변화 및 내성 상한 온도를 조사하였다. 실험 수온은 15°C를 중심으로 낮은 온도 쪽으로는 4, 5, 6, 7 및 10°C, 높은 온도 쪽으로는 17, 20, 23, 26 및 28°C에서 각각 적응시켜 산소소비량과 호흡수를 측정하였다. 수온의 하강과 상승은 15°C에서 사육하던 무지개 송어를 1일 1°C씩 순차 적응시키면서 각 수온에 7일간 적응시켰다.

무지개송어는 수온이 23°C 이상이 되면 산소소비율, 호흡수 및 헤모글로빈 함량에 변화를 가져오면서 체내 항상성이 급격하게 낮아지는 것으로 나타났다. 또한 생존 상한수온은 28°C로 나타났다. 무지개송어가 무리없이 생활할 수 있는 온도 범위는 10~20°C로서 10~15°C의 낮은 온도에서는 낮은 온도쪽으로, 15~20°C의 높은 온도에서는 높은 온도쪽으로 5°C 이상 급격한 변화를 주지 않는 것이 무지개송어의 생리활력에 현저한 변화가 나타나지 않는 것으로 조사되었다.

## 인 용 문 헌

김인배. 2000. 어류양식학. 도서출판구덕, 부산, 433pp.  
박성우 · 오명주. 2001. 수족혈액학. 대전, 212pp.  
이일남. 1990. 송어양식장 적지선정. 한국송어양식 25주년 기념집, 한국송어양식협회, 서울, pp. 187-191.  
이정열 · 김덕배. 2005. 급격한 염분변화에 따른 황복의 산소소비

와 질소배설. 한국양식학회지, 18: 45-51.  
이정열 · 허준욱. 2004. 뱀장어, *Anguilla japonica*의 산소소비, 암모니아 배설 및 혈액성상에 미치는 진동의 영향. 한국양식학회지, 17: 262-267.  
허준욱. 2002. 인위적 스트레스에 대한 양식어류의 생리학적 반응. 부경대학교 대학원 박사학위논문, 196pp.  
Barton, B.A. and G.K. Iwama. 1991. Physiological changes in fish from stress in aquaculture with emphasis on the response and effects of corticosteroids. Annu. Rev. Fish Dis., 1: 3-26.  
Bergheim, A., J.C. Simon and H. Liltved. 1998. A system for the treatment of sludge from land-based fish-farms. Aquat. Living Resour., 11: 279-287.  
Brett, J.R. 1970. Temperature-Fishers. In: Kinne, O. (ed.) Marine Ecology. Wiley-Interscience, Chichester, pp. 515-616.  
Brett, J.R. and N.R. Glass. 1973. Oxygen consumption and critical swimming speeds of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) in relation to size and temperature. J. Fish. Res. Bd. Can., 30: 379-387.  
Brett, J.R. and T.D.D. Groves. 1979. Physiological energetics. In: Hoar, W.S., D.J. Randall and J.R. Brett (eds.), Fish Physiology. Academic Press, New York, pp. 279-352.  
Buentello, J.A., W.H. Neill and D.M. Gatlin III. 2000. Effects of water temperature and dissolved oxygen on daily feed consumption, feed utilization and growth of channel catfish (*Ictalurus punctatus*). Aquaculture, 182: 339-352.  
Carlson, J.K. and G.R. Parsons. 2003. Respiratory and hematological responses of the bonnethead shark, *Sphyrna tiburo*, to acute changes in dissolved oxygen. J. Exp. Mar. Biol. Ecol., 294: 15-26.  
Chang, Y.J., M.H. Jeong, B.H. Min, W.H. Neill and L.P. Fontaine. 2005. Effects of photoperiod, temperature, and fish size on oxygen consumption in the black porgy *Acanthopagrus schlegelii*. J. Fish. Sci. Technol., 8: 142-150.  
Erez, J., M.D. Krom and T. Neuwirth. 1990. Daily oxygen variations in marine fish ponds, Elat, Israel. Aquaculture, 84: 289-305.  
Forsberg, O.I. 1994. Modelling oxygen consumption rates of post-smolt Atlantic salmon in commercial-scale land-based farms. Aquacult. Int., 2: 180-196.  
Hazel, J.R. 1993. Thermal biology. In: David H. Evans (ed.), The Physiology of Fishes. CRC Press, Boca Raton, pp. 427-467.  
Itazawa, Y. and I. Hanyu. 1991. Fish Physiology. Koseisha-Koseikaku, Tokyo, Japan, 621pp.  
Jobling, M. 1982. A study of some factors affecting rates of oxygen consumption of plaice, *Pleuronectes platessa* L. J. Fish Biol., 20: 501-516.  
Kawamoto, N. 1977. Fish Physiology. Koseisha-Koseikaku, Tokyo, Japan. 605pp.  
Kim, I.N., Y.J. Chang and J.Y. Kwon. 1995. The patterns of oxygen consumption in six species of marine fish. J. Kor. Fish. Soc., 28: 373-381.  
Perry, S.F. and S.D. Reid. 1993.  $\beta$ -adrenergic signal transduction in fish: interactive effects of catecholamines and cortisol. Fish.

- Physiol. Biochem., 11: 195-203.
- Prosser, C.L. 1973. Temperature. In: Prosser C.L. (ed.), Comparative Animal Physiology. Saunders, PA, pp. 362-428.
- Rodrigues, A.L., M.L. Bellinaso and T. Dick. 1989. Effect of some metal ions on blood and liver delta-aminolevulinate dehydratase of *Pimelodis maculata* Pisces, Pimelodidae. Comp. Biochem. Physiol., 94: 65-72.
- Schreck, C.B. 1982. Stress and rearing of salmonids. Aquaculture, 28: 241-249.
- Schreck, C.B. and P.B. Moyle. 1990. Methods for fish biology. American Fisheries Society, Bethesda, Maryland, pp. 1-684.
- Shamseldin, A.A., J.S. Clegg, C.S. Friedman, G.N. Cherr and M.C. Pillai. 1997. Induced thermotolerance in the pacific oyster, *Crassostrea gigas*. J. Shellfish. Res., 16: 487-491.
- Via, J.D., P. Villani, E. Gasteiger and H. Niederstatter. 1998. Oxygen consumption in sea bass fingerling *Dicentrarchus labrax* exposed to acute salinity and temperature changes: metabolic basis for maximum stocking density estimations. Aquaculture, 169: 303-313.
- Wi, J.H. and Y.J. Chang. 1976. A basic study on transport of live fish (I). Bull. Fish. Res. Dev. Agency, Korea, 15: 91-108.
- Witeska, M., B. Jezierska and J. Wolnicki. 2006. Respiratory and hematological response of tench, *Tinca tinca* (L.) to a short-term cadmium exposure. Aquaculture International, 14: 141-152.
- Withey, K.G. and R.L. Saunders. 1973. Effect of reciprocal photoperiod regime on standard rate of oxygen consumption of postsmolt Atlantic salmon (*Salmo salar*). J. Fish. Res. Bd. Can., 30: 1898-1900.
- Xie, X. and R. Sun. 1990. The bioenergetics of the southern catfish (*Silurus meridionalia* Chen). I. Resting metabolic rate as a function of body weight and temperature. Physiol. Zool., 63: 1181-195.
- Zakes, Z., K. Demska-Zakes, P. Jarocki and K. Stawecki. 2006. The effect of feeding on oxygen consumption and ammonia excretion of juvenile tench *Tinca tinca* (L.) reared in a water recirculating system. Aquaculture International, 14: 127-140.