

강도다리 *Platichthys stellatus*의 산소 소비율에 미치는 수온과 체중의 영향

오승용* · 장요순 · 노충환¹ · 최희정 · 명정구 · 김종관

한국해양연구원 해양생물자원연구부, ¹한국해양연구원 동해특성연구부

Effect of Water Temperature and Body Weight on Oxygen Consumption Rate of Starry Flounder *Platichthys stellatus* by Sung-Yong Oh*, Yo-Soon Jang, Choong Hwan Noh¹, Hee Jung Choi, Jung-Goo Myoung and Chong-Kwan Kim (Marine Living Resources Research Department, Korea Ocean Research & Development Institute, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea; ¹East Sea Environment Research Department, Korea Ocean Research & Development Institute, 695-1, Hujung-ri, Jukbyeon-myun, Uljin-gun, Gyeongbuk 767-813, Korea)

ABSTRACT The effect of water temperature (T) and body weight (W) on oxygen consumption of fasted starry flounder *Platichthys stellatus* was investigated in order to assess the metabolic response of this species at given conditions. The oxygen consumption rate (OCR) was measured under six different water temperatures (4, 7, 10, 13, 16 and 19°C) and at two different body weights (mean weight of fry group : 1.5 g; fingerling group : 37.4 g) at an interval of 5 minutes for 24 hours using a continuous flow-through respirometer. In each treatment three replicates were set up and a total 540 fish in fry groups and 90 fish in fingerling groups were used. The OCRs increased with increase of water temperature in both groups ($p < 0.001$). Mean OCRs at 4, 7, 10, 13, 16 and 19°C were 1386.0, 1601.7, 1741.0, 1799.2, 2239.1 and 2520.3 mg O₂ kg fish⁻¹ h⁻¹ in fry groups, and 83.8, 111.4, 126.3, 147.1, 187.7 and 221.3 mg O₂ kg fish⁻¹ h⁻¹ in fingerling groups, respectively. The OCRs decreased with increasing body weights at six different water temperatures ($p < 0.001$). The relationship between water temperature and body weight is described by the following equation : $OCR = 1520.91 + 40.85T - 49.22W$ ($r^2 = 0.95$, $p < 0.001$). The energy loss by metabolic response increased with an increase in water temperature and a decrease in body weight ($p < 0.001$). Mean energy loss rates by oxygen consumption at 4, 7, 10, 13, 16 and 19°C were 907.9, 1046.5, 1141.6, 1177.0, 1467.3 and 1650.1 kJ kg fish⁻¹ d⁻¹ in fry groups and 54.8, 73.0, 82.9, 96.2, 122.9 and 144.6 kJ kg fish⁻¹ d⁻¹ in fingerling groups, respectively. The Q₁₀ values of fingerling groups were higher than those of fry groups at given temperature ranges. The Q₁₀ values at 4~7°C, 7~10°C, 10~13°C, 13~16°C and 16~19°C were 1.62, 1.32, 1.12, 2.07 and 1.48 in fry groups, and 2.59, 1.52, 1.67, 2.25 and 1.73 in fingerling groups, respectively.

Key words : Starry flounder, *Platichthys stellatus*, oxygen consumption rate, water temperature, body weight

서 론

강도다리 (*Platichthys stellatus*)는 저수온을 선호하는 고급 양식 대상종(변 등, 2008) 중의 하나로서, 앞으로 산업적

개발 가능성이 높은 어종이다. 이를 위해서는 강도다리가 가지고 있는 생리적 특성 파악이 필요하다. Dalla Via *et al.* (1998)은 양식 생산성에 가장 큰 영향을 미치고 어류의 생존과 성장에 필수적이며 시스템 내 수용밀도와 먹이 공급량 등을 결정짓는 데 중요한 제한요인으로 용존산소를 언급하고 있다. 따라서 강도다리의 용존산소 소비량에 관한 정보는 강도다리의 산업적 개발을 위해 필수적으로 요구된

*교신저자: 오승용 Tel: 82-31-400-7728, Fax: 82-31-406-2882, E-mail: syoh@kordi.re.kr

다.

어류의 산소 소비율은 대사율을 나타내는 지표로 가장 널리 이용되며 (Kaushik, 1998), 수온 (Lyytikäinen and Jobling, 1998), 광주기 (Withey and Saunders, 1973; 오와 노, 2006), 염분 (Forsberg, 1994), 크기 (Wuenschel *et al.*, 2004) 그리고 사료 공급량 (Brett and Groves, 1979) 등과 같은 많은 요인들의 영향을 받는다. 이 중 수온은 어류의 모든 생리적 대사 반응에 직접적인 영향을 미치는 대사조절인자 (Bett and Groves, 1979)로서, 어류의 생존과 성장에 영향을 미치는 가장 중요한 환경인자이다 (Peck *et al.*, 2005). 또한 어류는 성장 단계에 따라 필요로 하는 에너지 요구량은 달라지며, 어린 개체일수록 단위 체중 당 높은 에너지 소비율을 보인다 (Fry, 1971; Dabrowski, 1986). 강도다리의 경우 변 등 (2008)이 수온과 광주기에 따른 산소 소비 리듬을 보고한 바가 있으며, 미성어에 국한되어 있어 제한된 정보를 제공하고 있다.

따라서 본 연구는 해양심층수 개발에 따라 유망 양식 대상종으로 고려되고 있는 강도다리의 자어와 치어를 대상으로 수온에 따른 산소 소비율, 에너지 소비율 그리고 Q_{10} 값을 조사하여 강도다리의 성장 단계별 생리적 특성을 파악하고 생존 및 성장을 위한 안정적인 사육환경 제시를 위한 기초 자료 수집에 목적이 있다.

재료 및 방법

1. 실험어 및 순치

강도다리 실험어는 한국해양연구원 해양심층수센터 (강원 고성 소재)와 경북 울진 소재 양어장에서 사육 중인 개체를 수집하여 사용하였다. 수온과 체중 변화에 따른 강도다리의 산소 소비율을 조사하기 위해 자어 (0.82 ± 0.001 g, 습중량)와 치어 (30.5 ± 1.4 g)를 각각 900마리와 300마리를 수집하였다. 산소 소비율을 측정하기 전 실험어는 400 L FRP 수조 2개와 침지식 생물여과조 ($1.0 \times 1.5 \times 2.0$ m, 3.0 ton)로 구성된 실내 순환여과식 시설 2 set에 각각 개체 크기별로 옮겨 1주 동안 $10.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 조건에서 순치시켰다. 순치기간 동안 시판용 해산어 상품사료 (E-hwa Feed Co., Korea, 단백질 함량 42.5~47.8%)를 일간 어체중의 0.1~3.0%를 공급하였으며, 수온은 히터와 냉각기를 이용하여 조절하였다. 사육수 내 용존산소는 유량 조절과 에어레이션을 통해 80% 이상의 포화상태를 유지하였다. 순치 기간 동안 사육수의 pH는 8.0 ± 0.1 , 염분은 34.2 ± 1.1 psu를 유지하였다.

2. 실험 장치

수온과 체중에 따른 강도다리의 산소 소비율 실험은 오

와 노 (2006)의 호흡 대사율 측정 시스템을 사용하였다. 측정 시스템은 공급탱크 (head tank), 저수탱크 (reservoir), 호흡실 (어류 사육조), 용존산소 측정실, 카트리지 필터 그리고 자외선 살균기로 구성된 완전 폐쇄형 순환 장치였다. 실험 수온을 유지하기 위해 공급탱크와 저수탱크에는 자동 온도 조절 장치가 연결되어 있는 히터와 냉각기를 설치하였고, 순환수 내 산소 포화도를 95% 이상 유지하기 위해 2~3개의 에어스톤을 에어블로워에 연결하여 사용하였다. 실험 장치 내 실험어 외의 산소 소비 요인인 입자성 부유물질과 미생물의 영향을 최소화 하기 위해 카트리지 필터와 유수식 자외선 살균기 (Model: P301, 처리 용량 3 ton hr^{-1} , 삼지통상)를 각각 사용하였다. 저수탱크에서 양수된 순환수는 $10 \mu\text{m}$ 와 $1 \mu\text{m}$ 의 카트리지 필터를 연속적으로 거친 후 자외선 살균기를 통과한 후 공급탱크로 유입시켰다. 공급탱크 내 순환수는 호흡실을 거친 후 산소 probe가 설치된 용존산소 측정실을 통과하도록 하였고, 유속은 호흡실 유입수와 배출수간 용존산소 농도 차이가 최소한 0.2 mg L^{-1} 가 되도록 유지하였으며 (오와 노, 2006), 실험 기간 동안의 평균 유량은 $36.0 \pm 0.2 \text{ L h}^{-1}$ 이었다.

3. 실험 방법

실험 조건의 순치는 200 L 유리수조 2개와 침지식 생물여과조 ($1.0 \times 1.2 \times 0.5$ m, 0.6 ton)로 구성된 순환여과식 시스템 6 set에서 이루어졌다. 실내 수조에 순치된 각 체중별 강도다리를 각 set별 유리수조마다 자어와 치어를 100마리와 50마리씩, 총 12개의 유리수조에 분산 수용하였다. 실험 수온인 4°C , 7°C , 10°C , 13°C , 16°C 그리고 19°C 로 조절하기 위해 10°C 실험구 1 set를 제외하고 나머지 5 set의 순환여과식 시스템은 10°C 로부터 2~6일만에 걸쳐 서서히 낮추거나 높였다.

수온 조절이 이루어진 후 강도다리 자어와 치어는 10일 이상 각 실험 조건에 추가 순치시켰으며, 순치 기간 중 사료는 하루에 어체중의 0.2~3.0% 비율로 공급하였다. 실험 시작 전 2일간 실험어들을 절식시킨 후 2-phenoxyethanol (Sigma, St. Louis, MO, USA)로 마취시켜 무게를 측정 후 각 실험 조건의 호흡실에 수용하였다. 실험에 이용된 강도다리 자어와 치어의 평균 체중은 각각 1.5 ± 0.4 g과 37.4 ± 2.3 g이었으며, 호흡실에 각각 30마리와 5마리씩 3반복 수용하여 실험을 실시하였다. 실험 장치 내 수용 시 체중 측정 및 이동에 따른 영향을 배제하기 위해 수용 후 3시간 동안 안정시킨 후 24시간 동안 산소 소비율을 측정하였다.

4. 용존산소량 측정 및 자료 처리

용존산소량의 측정은 호흡실 전후에 설치된 산소 측정 probe와 자료 저장 장치인 Multi Data Logger System (Oxy-

guard, Denmark)을 사용하였다. 호흡실 유입수와 배출수의 용존산소 농도는 $\mu\text{Log VL 100}$ Software를 이용하여 5분마다 측정됨과 동시에 산소 측정 판넬을 통해 Data Logger에 저장되었다. 이들 자료를 프로그램을 통해 다운로드하여 분석에 이용하였다. 강도다리 자어와 치어의 수온과 체중에 따른 산소 소비율 (oxygen consumption rate, OCR)은 Jobling (1982)이 보고한 다음과 같은 방법에 따라 구하였다.

$$\text{OCR} (\text{mg O}_2 \text{ kg fish}^{-1} \text{ h}^{-1}) = (\text{C}_i - \text{C}_o) \times Q/W \quad (\text{eq. 1})$$

- 여기서, C_i =어류 호흡실 유입수의 용존산소 농도 (mg L^{-1})
- C_o =어류 호흡실 배출수의 용존산소 농도 (mg L^{-1})
- Q =어류 호흡실을 지나가는 시간당 유량 (L h^{-1})
- W =호흡실 수용 어체중 (kg)

계산된 산소 소비율은 1시간 단위로 pooling하여 24시간 동안의 산소 소비율 패턴과 시간당 평균 산소 소비율을 구하였으며, 수온 변화에 따른 강도다리의 자어와 치어의 산소 소비율 변화에 따른 대사 반응율 (Q_{10})은 다음 식 (Wuenschel *et al.*, 2005)을 이용해 구하였다.

$$Q_{10} = \left[\frac{R_2}{R_1} \right]^{\left(\frac{10}{T_2 - T_1} \right)} \quad (\text{eq. 2})$$

여기서, R_1 과 R_2 는 수온 T_1 과 T_2 일 때의 평균 산소 소비율 위 식 (eq. 1)을 통해 계산된 산소 소비율 ($\text{mg O}_2 \text{ kg fish}^{-1} \text{ h}^{-1}$)을 시간에 대한 소비율로 도식화하여 곡선 아래 면적의 적분을 통해 일간 산소 소비율 ($\text{mg O}_2 \text{ kg fish}^{-1} \text{ d}^{-1}$)을 추정

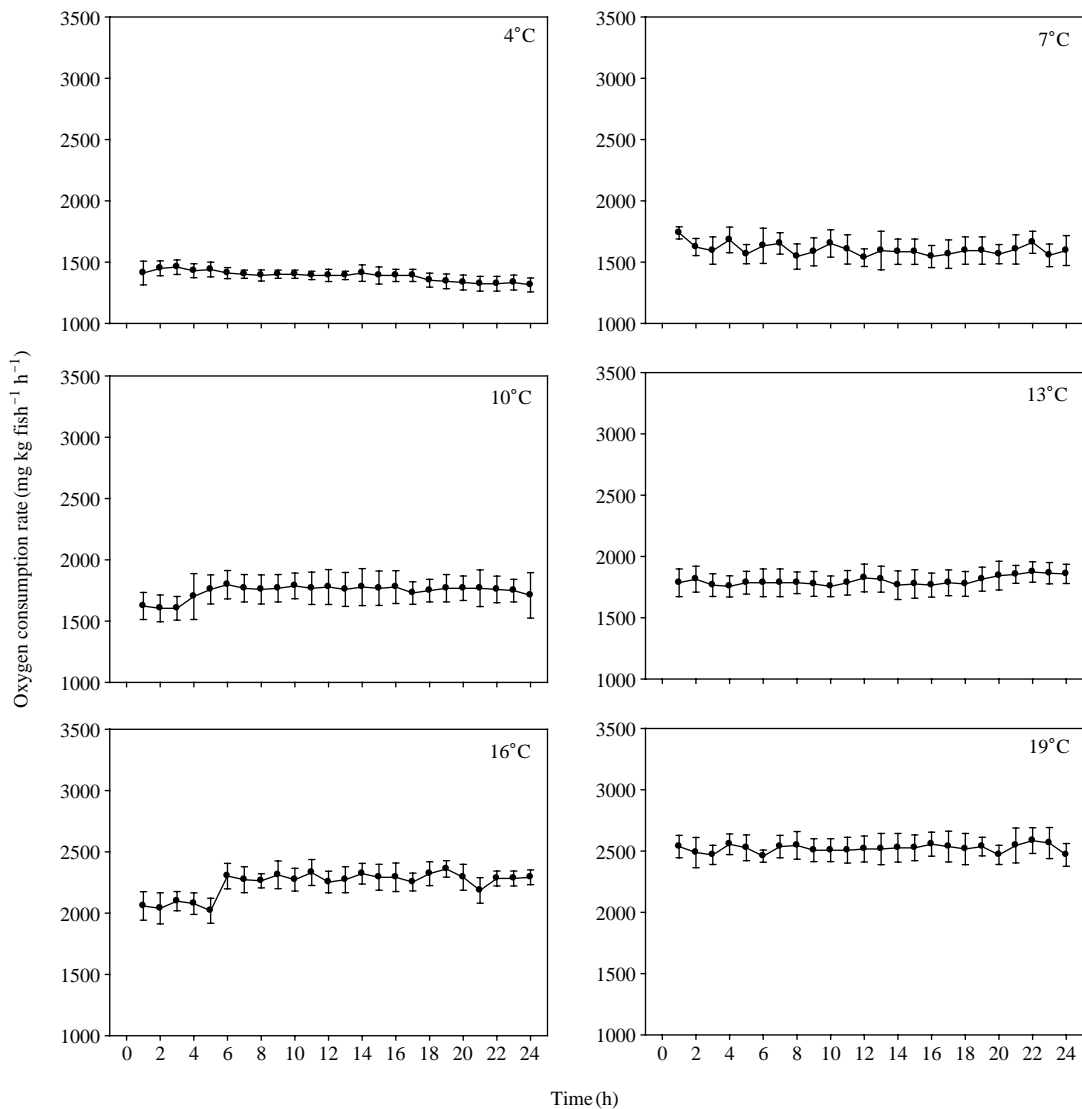


Fig. 1. Changes of oxygen consumption rate in fry (mean weight : 1.5 g) of fasted starry flounder *Platichthys stellatus* under six different water temperatures. Values indicate mean \pm S.E. (n=3).

한 뒤, Elliot and Davison (1975)이 보고한 산소 소모에 따른 에너지 전환 계수($1\text{ mL O}_2=19.9\text{ J}=4.776\text{ cal}$)를 이용하여 각 수온별 대사 작용에 의한 에너지 소비율을 구하였다.

모든 자료의 통계처리는 SPSS 11.5 (SPSS Inc., USA) 통계 프로그램으로 수온에 대한 영향은 분산분석(ANOVA)를 실시하여 Tukey's multiple range test로 평균간 유의성을 95% 신뢰수준에서 검정하였고, 체중에 대한 영향은 t-test로 검정하였다. 각 수온과 체중에 따른 시간당 평균 산소 소비율과 두 인자의 복합 영향은 two-way ANOVA를 통해 검정하였다.

결 과

강도다리 체중과 수온에 따른 시간당 평균 산소 소비율

의 일간 변화 패턴은 Fig. 1(자어)과 Fig. 2(치어)에 그리고 그 결과를 Table 1에 나타내었다. 수온에 따른 시간당 평균 산소 소비율은 강도다리 자어의 경우, 수온 4, 7, 10, 13, 16 그리고 19°C에서 각각 1386.0, 1601.7, 1741.0, 1799.2, 2239.1 그리고 2520.3 $\text{mg O}_2\text{ kg fish}^{-1}\text{ h}^{-1}$ 이었고, 치어의 경우 각각 83.8, 111.4, 126.3, 147.1, 187.7 그리고 221.3 $\text{mg O}_2\text{ kg fish}^{-1}\text{ h}^{-1}$ 을 보였다. 수온(T)에 따른 강도다리 자어와 치어의 시간당 평균 산소 소비율은 각각 $\text{OCR}=1044.27+72.78T$ ($r^2=0.92, p<0.001$)와 $\text{OCR}=43.61+8.93T$ ($r^2=0.93, p<0.001$)의 회귀식을 보였다. 체중에 따른 시간당 평균 산소 소비율은 4°C의 경우 강도다리의 자어에 비해 치어는 약 94.0% 감소하였으며, 7, 10, 13, 16 그리고 19°C에서는 각각 93.0, 92.7, 91.8, 91.6, 91.2% 감소하였다. 이상의 결과에서 강도다리 자어와 치어 모두 수온이 높아질수록 시간당

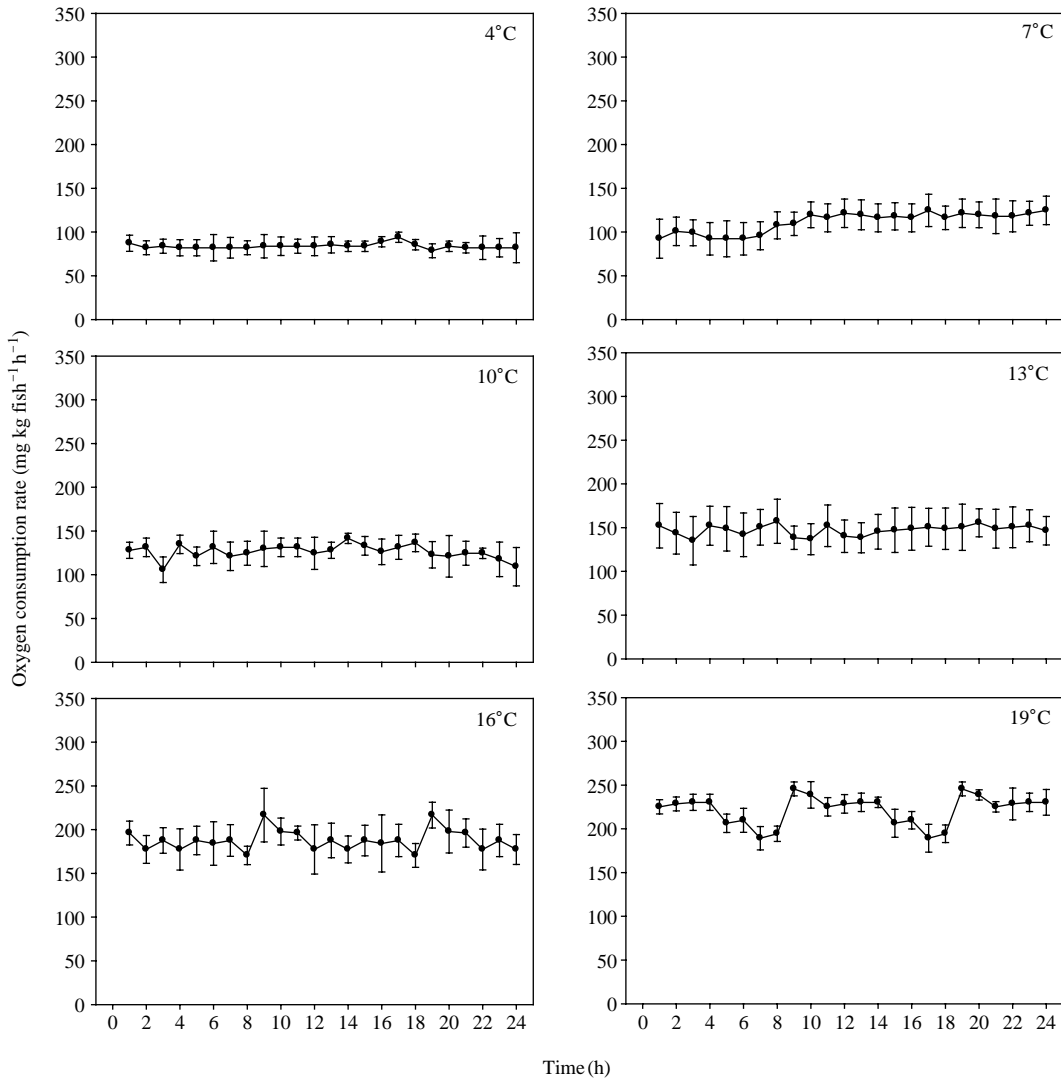


Fig. 2. Changes of oxygen consumption rate in fingerling (mean weight : 37.4 g) of fasted starry flounder *Platichthys stellatus* under six different water temperatures. Values indicate mean \pm S.E. (n=3).

평균 산소 소비율은 유의하게 증가하였으며, 모든 수온에서 자어가 치어보다 높은 소비율을 보여, 체중($p < 0.001$), 수온($p < 0.001$), 그리고 두 인자의 교호작용($p < 0.001$) 역시

Table 1. The oxygen consumption rate (OCR) of the fasted starry flounder *Platichthys stellatus* under six different water temperatures (T) and two different body weights (W)

T (°C)	W (g)	
	1.5	37.4
	mg O ₂ kg fish ⁻¹ h ⁻¹ *	
4	1386.0 ± 7.2 ^a	83.8 ± 1.0 ^A
7	1601.7 ± 11.6 ^b	111.4 ± 2.1 ^B
10	1741.0 ± 13.8 ^c	126.3 ± 1.7 ^C
13	1799.2 ± 10.6 ^d	147.1 ± 2.3 ^D
16	2239.1 ± 14.9 ^e	187.7 ± 2.4 ^E
19	2520.3 ± 10.8 ^f	221.3 ± 2.3 ^F
Regression	OCR=1044.27+72.78T (r ² =0.92, p<0.001)	OCR=43.61+8.93T (r ² =0.93, p<0.001)

Two-way ANOVA	
W	p=0.000
T	p=0.000
W × T	p=0.000

*Values (mean ± S.E.) with different superscripts are significantly different (n=72, p<0.001)

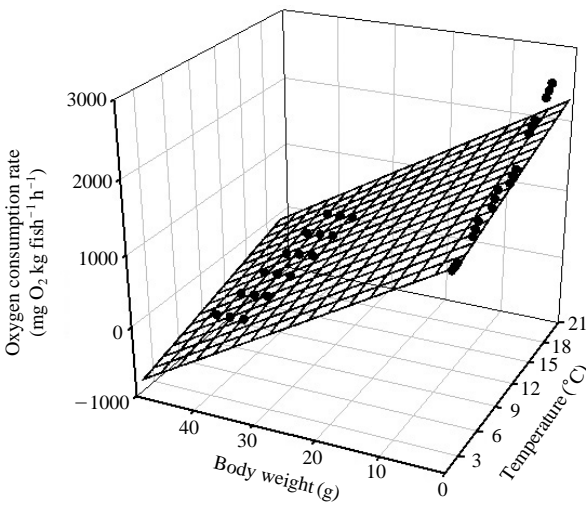


Fig. 3. Three dimensional diagram representing the relationships between water temperature, body weight and oxygen consumption rate of fasted starry flounder *Platichthys stellatus*.

Table 2. Q₁₀ value of the starry flounder *Platichthys stellatus* for different water temperature ranges and body weights under fasted condition

Body weight (g)	4~7°C	7~10°C	10~13°C	13~16°C	16~19°C
1.5	1.62	1.32	1.12	2.07	1.48
37.4	2.59	1.52	1.67	2.25	1.73

산소 소비율에 유의적으로 영향을 미쳤으며 (Table 1), 수온 (T) 증가와 체중 (W) 감소에 따라 증가하는 상관관계 (OCR=1520.91+40.85T-49.22W, r²=0.95, p<0.001, Fig. 3)를 보였다.

강도다리 체중과 수온에 따른 대사 에너지 소비율을 Fig. 4에 나타내었다. 일간 평균 대사 에너지 소비율은 자어의 경우 수온 4, 7, 10, 13, 16 그리고 19°C에서 각각 907.9, 1046.5, 1141.6, 1177.0, 1467.3 그리고 1650.1 kJ kg fish⁻¹ d⁻¹로 나타나 수온 상승에 따라 유의적 (p<0.05)으로 증가하였다 (10°C와 13°C 제외). 치어의 경우 수온 4, 7, 10, 13, 16 그리고 19°C에서 각각 54.8, 73.0, 82.9, 96.2, 122.9 그리고 144.6 kJ kg fish⁻¹ d⁻¹로 나타나 자어와 마찬가지로 수온 상승에 따라 대사 에너지 소비율은 증가하였지만, 4~7°C, 7~10°C, 10~13°C 그리고 16~19°C 사이에서는 차이를 보이지 않았다 (p<0.05).

수온 변화에 따른 강도다리 자어와 치어의 Q₁₀ 값을 Table 2에 나타내었다. 수온 4~7°C, 7~10°C, 10~13°C, 13~16°C 그리고 16~19°C 구간의 Q₁₀ 값은 자어의 경우 각각 1.62, 1.32, 1.12, 2.07 그리고 1.48로 나타나, 13~16°C 범위에서 가장 높은 대사 반응을 보였다. 또한 4~7°C에서도 두 번째로 높은 대사 반응을 보여 낮은 수온 범위에서도 높은 대사 반응의 변화를 보이는 것으로 나타났다. 반면에, 10~13°C 구간에서는 가장 낮은 Q₁₀ 값을 보여 큰 대사 반응의 변화가 없는 것으로 나타났다. 치어의 경우 수온 4~7°C, 7~10°C, 10~13°C, 13~16°C 그리고 16~19°C 구간에서 각각 2.59, 1.52, 1.67, 2.25 그리고 1.73의 Q₁₀ 값을 보여, 4~7°C와 13~16°C 범위에서 가장 높은 대사 반응을 보여, 자어와 마찬가지로 동일한 수온 범위에서 높은 대사 반

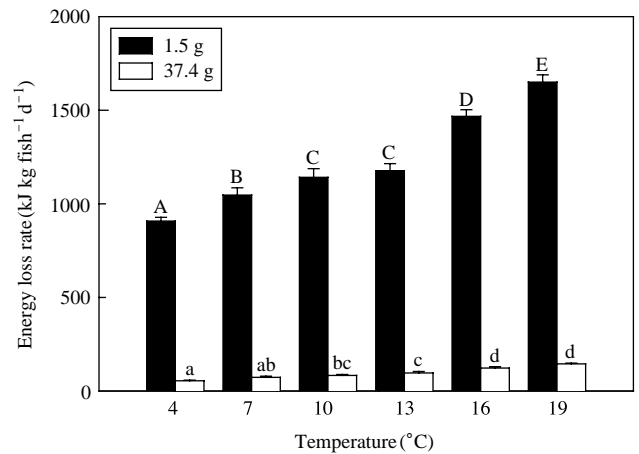


Fig. 4. Metabolic energy loss rates under six different water temperatures (4, 7, 10, 13, 16 and 19°C) and two different body weights (1.5 g and 37.4 g) in fasted starry flounder *Platichthys stellatus*. Values indicate mean ± S.E. (n=3). Significant differences between groups are indicated with different letters (p<0.001).

응의 변화를 보이는 것으로 나타났지만, 치어에서는 13~16°C 범위보다 4~7°C 범위에서 더 높은 반응을 보였다.

고 찰

수온은 어류와 같은 변온동물의 대사 반응에 직접적으로 영향을 미치는 가장 중요한 대사 조절 인자로서 (Brett and Groves, 1979), 수온 상승은 어류의 체내 항상성 (homeostasis) 유지를 위한 생화학적 반응을 유발함으로써 높은 대사 반응을 일으킨다 (Spanopoulos-Hernández *et al.*, 2005).

본 실험에서 수온 상승은 강도다리 자어와 치어의 대사율을 상승시키는 주요 요인으로 작용하였으며, 타 연구 결과들과 일치하였다 (Fonds *et al.*, 1992; Lyytikäinen and Jobling, 1998; Mitsunaga *et al.*, 1999; Wuenschel *et al.*, 2005). 변 등 (2008)도 역시 강도다리 (평균 무게 230 g)를 대상으로 24시간 절식 후 수온 15, 20 그리고 25°C 조건에서 산소 소비율을 조사한 결과 각각 63.8~77.2, 72.4~87.2 그리고 88.4~92.8 mg O₂ kg fish⁻¹ h⁻¹로 나타나 수온 상승에 따라 대사율이 증가한다고 보고하였다. 본 실험에서 수온 4°C에서 19°C으로 상승할 경우 자어의 경우 각각 1386.0 mg O₂ kg fish⁻¹ h⁻¹과 2520.3 mg O₂ kg fish⁻¹ h⁻¹의 산소 소비율을 보여 약 1.82배 증가하였고, 치어의 경우 각각 83.8 mg O₂ kg fish⁻¹ h⁻¹과 221.3 mg O₂ kg fish⁻¹ h⁻¹으로 나타나 약 2.64배 증가하였다. 강도다리 미성어 (230 g)의 경우 수온 15°C와 20°C에서 각각 63.8~77.2 mg O₂ kg fish⁻¹ h⁻¹와 72.4~87.1 mg O₂ kg fish⁻¹ h⁻¹로 나타나 약 1.13배 증가하는 결과 (변 등, 2008)를 보여 본 실험과 차이가 있었다. 이것은 실험어의 크기와 실험 수온의 차이가 가장 큰 원인으로 생각되며, 이와 아울러 실험어의 절식 기간 및 실험 방법의 차이에서도 기인하는 것으로 생각된다.

체중 증가에 따른 대사율의 감소는 일반적인 경향을 나타내었다 (Fry, 1971; Dabrowski, 1986; Degani *et al.*, 1989; Cai and Summerfelt, 1992; 오 등, 2007). 오 등 (2007)은 12.9 g과 351.1 g의 조피볼락 (*Sebastes schlegeli*)을 대상으로 15, 20 그리고 25°C에서 산소 소비율을 조사한 결과 15°C의 경우 소형어에 비해 대형어의 시간당 평균 산소 소비율이 평균 56.1% 감소하였으며, 20°C와 25°C에서는 각각 63.7%와 61.1% 감소하는 결과를 보고하였다. 또한 4~133 g의 walleye (*Stizostedion vitreum*)를 대상으로 산소 소비율을 조사한 결과 소형어에 비해 대형어의 시간당 평균 산소 소비율이 20°C와 25°C에서 각각 64%와 77% 감소하였다 (Cai and Summerfelt, 1992). 변 등 (2008)은 230 g의 강도다리 미성어를 대상으로 15~25°C 범위에서 63.8~92.8 mg O₂ kg fish⁻¹ h⁻¹의 산소 소비율을 보고하여 본 실험에서 나타난 자어와 치어의 산소 소비율에 비해 감소하였다. 그리고 본

실험에서 자어에 비해 치어의 산소 소비율이 실험 수온에 따라 91.2~93.0% 감소하는 결과를 보여 이전 실험 결과에 비해 높은 감소 비율을 보였다. 이것은 강도다리 자어의 대사율이 치어에 비해 훨씬 높다는 것을 나타내며, 어종 및 크기 차이에 따라 대사 반응이 다르다는 것을 알 수 있다.

어류는 수중 생태계 내에서 대사 활동을 통해 생존하고 성장한다. 이 결과 많은 양의 에너지를 소비하며, 에너지 수지에 있어서 대사는 상당한 부분을 차지한다 (Adams and Breck, 1990). 특히 수온 변화는 어류의 대사 에너지 소비에 주된 원인이 된다 (오 등, 2007). 오 등 (2007)은 조피볼락 12.9 g과 351.1 g을 대상으로 15°C에서 25°C로 수온이 상승할 경우 소형어의 에너지 소비율은 282.9 kJ kg fish⁻¹ d⁻¹에서 576.3 kJ kg fish⁻¹ d⁻¹로 증가하였고, 대형어의 에너지 소비율은 124.3 kJ kg fish⁻¹ d⁻¹에서 224.1 kJ kg fish⁻¹ d⁻¹로 증가한다고 보고하였다. 본 실험 역시 강도다리 자어와 치어 모두 수온 상승에 따른 에너지 소비율이 지속적으로 증가하는 결과를 보여 이전 실험 결과와 일치하였다. 특히 자어와 치어 모두 13°C에 비해 16°C에서 높은 에너지 소비율을 보이는 것으로 나타나 이 수온 범위에서 적절한 에너지 공급이 있어야 할 것으로 판단된다. 이 결과는 강도다리의 생존 및 성장에 관한 에너지 수지의 생체역학 모델 구축 (Bartell *et al.*, 1986)에 있어 중요한 자료로 활용할 수 있을 것이다.

Q_{10} 값은 온도 상승에 따른 수서 동물의 체내 적응을 위한 에너지 요구량을 나타낸다 (Spanopoulos-Hernández *et al.*, 2005). 본 실험 결과 모든 수온 구간에서 강도다리 자어보다 치어의 Q_{10} 값이 높게 나타나 자어보다는 치어가 온도 변화에 적응하는데 많은 에너지를 사용한다는 것을 알 수 있었다. 또한 강도다리 자어와 치어 모두 4~7°C와 13~16°C 사이에서 높은 Q_{10} 값을 보였다. 특히 4~7°C 범위와 같이 낮은 수온 범위에서 높은 Q_{10} 값을 보이는 점은 저수온 (4°C)에 적응된 후 이루어진 수온 상승이 높은 대사 에너지를 요구한다는 것을 알 수 있었다. Q_{10} 값과 수온 사이의 관계를 통해 어류의 선호 수온을 간접적으로 추정할 수 있다 (Kita *et al.*, 1996). Kita *et al.* (1996)은 대상 어류의 적응 수온이 상승함과 동시에 Q_{10} 값이 감소하는 시점이 어류 성장을 위한 최적 수온과 일치한다고 보고하였다. Das *et al.* (2005) 역시 유사한 결과를 보고하였다. 본 실험에서 강도다리 자어와 치어 모두 7~10°C와 10~13°C에서는 거의 일정한 Q_{10} 값을 보였고 13~16°C에서 높은 값을 보인 후 16~19°C에서 감소하는 경향을 보였다. 따라서 강도다리 자어와 치어의 선호 또는 최적 수온이 16~19°C 범위일 것으로 추정되지만, 동일 수온 범위에서 성장 실험을 통한 확인이 요구된다.

이상의 결과에서 강도다리의 산소 소비율은 수온과 체중 그리고 두 인자의 상호작용에 의해 유의한 차이를 보였으

며, 자어 보다는 치어가 수온 변화에 더 많은 에너지를 사용한다는 것을 알 수 있었다. 또한 수온 변화에 대한 강도다리 대사 반응을 통해 성장을 위한 최적 수온을 추정할 수 있었다.

요 약

강도다리의 수온과 체중에 따른 대사 반응을 조사하기 위해 절식한 자어(습중량, 1.5 ± 0.4 g, 540마리)와 대형어(37.4 ± 2.3 g, 90마리)를 대상으로 여섯 가지 수온(4, 7, 10, 13, 16 그리고 19°C)에 따라 유수식 형태의 호흡실을 이용하여 24시간 동안 5분 간격(3반복)으로 산소 소비율(oxygen consumption rate, OCR)을 측정하였다. 수온과 체중 그리고 두 인자의 상호작용 모두가 강도다리의 산소 소비율에 유의한 영향을 미쳤다($p < 0.001$). 수온 상승에 따라 강도다리 자어와 치어의 산소 소비율은 모두 유의적으로 증가하였다($p < 0.001$). 수온 4, 7, 10, 13, 16 그리고 19°C에서의 시간당 평균 산소 소비율은 자어의 경우 각각 1386.0, 1601.7, 1741.0, 1799.2, 2239.1 그리고 2520.3 mg O₂ kg fish⁻¹ h⁻¹이었고, 치어의 경우 각각 83.8, 111.4, 126.3, 147.1, 187.7 그리고 221.3 mg O₂ kg fish⁻¹ h⁻¹이었다. 실험 수온 조건에서 체중 증가에 따라 산소 소비율은 유의하게 감소하였다($p < 0.001$). 강도다리의 산소 소비율에 미치는 수온(T)과 체중(W)의 상관관계는 $OCR = 1520.91 + 40.85T - 49.22W$ ($r^2 = 0.95$, $p < 0.001$)이었다. 대사 작용에 의한 에너지 손실은 수온 증가와 체중 감소에 따라 증가하였다($p < 0.001$). 수온 4, 7, 10, 13, 16 그리고 19°C에서 일간 평균 에너지 손실은 자어의 경우 각각 907.9, 1046.5, 1141.6, 1177.0, 1467.3 그리고 1650.1 kJ kg fish⁻¹ d⁻¹이었고, 치어의 경우 각각 54.8, 73.0, 82.9, 96.2, 122.9 그리고 144.6 kJ kg fish⁻¹ d⁻¹이었다. Q₁₀ 값은 4~7°C, 7~10°C, 10~13°C, 13~16°C 그리고 16~19°C 구간에서 자어의 경우 각각 1.62, 1.32, 1.12, 2.07 그리고 1.48이었고, 치어의 경우 2.59, 1.52, 1.67, 2.25 그리고 1.73이었다.

사 사

본 연구는 한국해양연구원 기본과제(PE98204)와 국토해양부 해양심층수의 다목적 이용 개발 과제의 지원에 의해서 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

인 용 문 헌

변순규 · 정민환 · 이종하 · 이배익 · 구학동 · 박상언 · 김이청 · 장

영진. 2008. 수온에 따른 강도다리 *Platichthys stellatus*의 산소소비 리듬. 한국수산학회지, 41: 113-118.

오승용 · 노충환. 2006. 수온과 광주기에 따른 볼락, *Sebastes inermis* 치어의 산소 소비율. 한국양식학회지, 19: 210-215.

오승용 · 노충환 · 명정구 · 조재윤. 2007. 조피볼락, *Sebastes schlegeli*의 산소 소비율에 미치는 수온과 체중의 영향. 한국어류학회지, 19: 1-7.

Adams, S.M. and J.E. Breck. 1990. Bioenergetics. In: Schreck, C.B. and P.B. Moyle (eds.), Methods for Fish Biology. American Fisheries Society, Bethesda, MA, pp. 389-415.

Bartell, S.M., J.E. Breck, R.H. Gardner and A.L. Brenket. 1986. Individual parameter perturbation and error analysis of fish bioenergetics models. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 43: 160-168.

Brett, J.R. and T.D.D. Groves. 1979. Physiological energetics. In: Hoar, W.H., Randall, D.J. and Brett, J.R. (eds.), Bioenergetics and Growth. Fish Physiology. vol. 8. Academic Press, New York, pp. 279-352.

Cai, Y. and R.C. Summerfelt. 1992. Effects of temperature and size on oxygen consumption and ammonia excretion by walleye. Aquaculture, 104: 127-138.

Dabrowski, K.R. 1986. Active metabolism in larval and juvenile fish: ontogenetic changes, effect of water temperature and fasting. Fish Physiol. Biochem., 1: 125-144.

Das, T., A.K. Pal, S.K. Chakraborty, S.M. Manush, N.P. Sahu and S.C. Mukherjee. 2005. Thermal tolerance, growth and oxygen consumption of *Libeo rohita* fry (Hamilton, 1822) acclimated to four temperatures. J. Ther. Biol., 30: 378-383.

Dalla Via, J., P. Villani, E. Gasteiger and H. Niederstätter. 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.

Degani, G., M.L. Gallagher and A. Meltzer. 1989. The influence of body size and temperature on oxygen consumption of the European eel, *Anguilla anguilla*. J. Fish Biol., 34: 19-24.

Elliot, J.M. and W. Davison. 1975. Energy equivalents of oxygen consumption in animal energetics. Oecologia, 19: 195-201.

Fonds, M., R. Cronie, A.D. Vethaak and P. Van Der Puly. 1992. Metabolism, food consumption and growth of plaice (*Pleuronectes platessa*) and flounder (*Platichthys flesus*) in relation to fish size and temperature. Neth. J. Sea Res., 29: 127-143.

Forsberg, O.L. 1994. Modeling oxygen consumption rates of post-smolt Atlantic salmon in commercial-scale landbased farms. Aquac. Int., 2: 180-196.

Fry, F.E.J. 1971. The effect of environmental factors on the physiology of fish. In: W.S. Hoar and D.J. Randall. (eds.), Fish Physiology. Academic Press, New York, pp. 1-98.

Jobling, M. 1982. A study of some factors affecting rates of oxygen consumption of plaice, *Pleuronectes platessa* L. J. Fish Biol., 20: 501-516.

Kaushik, S.J. 1998. Nutritional bioenergetics and estimation of waste production in non-salmonids. Aqua. Liv. Res., 11:

211-217.

- Kita, J., S. Tsuchida and T. Setoguma. 1996. Temperature preference and tolerance and oxygen consumption of the marbled rockfish, *Sebastes marmoratus*. Mar. Biol., 125: 467-471.
- Lyytikäinen, T. and M. Jobling. 1998. The effects of temperature fluctuations on oxygen consumption and ammonia excretion of underyearling Lake Inari Arctic charr. J. Fish Biol., 52: 1186-1198.
- Mitsunaga, Y., W. Sakamoto, N. Arai and A. Kasai. 1999. Estimation of the metabolic rate of wild red sea bream *Pagrus major* in different water temperatures. Nippon Suisan Gakk., 65: 48-54.
- Peck, M.A., L.J. Buckley and D.A. Bengtson. 2005. Effects of temperature, body size and feeding on rates of metabolism in young-of-the-year haddock. J. Fish Biol., 66: 911-923.
- Spanopoulos-Hernández, M., C.A. Martínez-Palacios, R.C. Vanegas-Pérez, C. Rosas and L.G. Ross. 2005. The combined effects of salinity and temperature on the oxygen consumption of juvenile shrimps *Litopenaeus stylirostris* (Stimpson, 1874). Aquaculture, 244: 341-348.
- 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.
- Wuenschel, M.J., A.R. Jugovich and J.A. Hare. 2005. Metabolic response of juvenile gray snapper (*Lutjanus griseus*) to temperature and salinity: Physiological cost of different environments. J. Exp. Mar. Biol. Ecol., 321: 145-154.
- Wuenschel, M.J., R.G. Werner and D.E. Hoss. 2004. Effect of body size, temperature and salinity on the routine metabolism of larval and juvenile spotted seatrout. J. Fish Biol., 64: 1088-1102.