

Article

대구 *Gadus macrocephalus* 치어의 산소 소비율에 미치는  
수온과 광주기의 영향

오승용<sup>1\*</sup> · 박흥식<sup>2</sup> · 김종관<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국해양연구원 해양생물자원연구부

<sup>2</sup>한국해양연구원 해양과학국제협력센터  
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29

Effect of Water Temperature and Photoperiod on the Oxygen Consumption  
Rate of Juvenile Pacific Cod *Gadus macrocephalus*

Sung-Yong Oh<sup>1\*</sup>, Heung-Sik Park<sup>2</sup>, and Chong-Kwan Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Marine Living Resources Research Department, KORDI

<sup>2</sup>Center for International Cooperative Programs, KORDI  
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

**Abstract :** A study was conducted to investigate the effect of water temperature and photoperiod on the oxygen consumption of the fasting juvenile Pacific cod *Gadus macrocephalus* (mean body weight 79.9±2.0 g) in order to quantify metabolic response of the species under given conditions. The oxygen consumption rate (OCR) of *G. macrocephalus* was measured under a combination of four different water temperatures (7, 10, 13 and 16°C) and three different photoperiods (24L:0D, 12L:12D and 0L:24D) with an interval of 5 minutes over a 24-hour period using a closed recirculating respirometer. Three replicates were set up in each treatment. OCRs increased with increased water temperatures under all photoperiod conditions (P<0.001). Mean OCRs at 7, 10, 13 and 16°C ranged from 793.7~1108.4, 1145.7~1570.3, 1352.8~1742.5 and 1458.2~1818.6 mg O<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>, respectively. Under all water temperature conditions except 7°C (P<0.001), mean OCRs of *G. macrocephalus* were the highest in continuous light (24L:0D) followed by 12L:12D and 0L:24D photoperiods. Mean OCRs of fish exposed to the 12L:12D photoperiod were significantly higher during the light phase than during the dark phase under all temperature conditions (P<0.001). Q<sub>10</sub> values ranged from 3.19~5.13 between 7 and 10°C, 1.41~1.74 between 10 and 13°C and 1.15~1.35 between 13 and 16°C, respectively. Based on overall results, water temperature, photoperiod and their combinations exerted a significant influence on the metabolic rate of juvenile cod. This study provides empirical data for estimating the amount of oxygen demand and managing the culture of cod under the given water temperatures and photoperiods.

**Key words :** *Gadus macrocephalus*, oxygen consumption, water temperature, photoperiod

1. 서 론

환경 변화에 대한 생물의 적응은 각 생물이 가지는 중

특이적 항상성(homeostasis) 조절 메카니즘에 따라 나타나는 생화학적 반응 정도에 따라 달라진다(Spanopoulos-Hernández et al. 2005). 이와 같은 생물 체내 생화학 반응은 대사 매개물로서 산소가 필수적이며, 다양한 환경 변화로 유발된 생물의 생화학적 대사 반응물의 지표로서 산소

\*Corresponding author. E-mail : syoh@kordi.re.kr

소비율이 널리 이용되고 있다(Kaushik 1998). 특히, 해양 어류의 산소 소비율에 대한 정보는 성장을 위한 사료 내 에너지 요구량의 추정(Degani et al. 1989), 최적 성장 수온 파악(Kita et al. 1996) 및 성장 모델(bioenergetic model) 설정(Kaushik 1998; Wuenschel et al. 2005)을 위한 기초 자료로 활용할 수 있다.

어류의 산소 소비율은 수온(오와 노 2006; 오 등 2006; Lyytikäinen and Jobling 1998), 개체 크기(오 등 2009; Wuenschel et al. 2004), 광주기(오와 노 2006; 오 등 2006; Biswas et al. 2002; Biswas and Takeuchi 2002), 염분(Dalla Via et al. 1998) 그리고 먹이 섭취량(Brett and Groves 1979) 등 많은 내·외부 인자들의 영향을 받는다. 이 중 수온은 어류와 같은 변온동물의 체내 대사생리반응에 직접적인 영향을 미치는 대사조절인자로서(Brett and Groves 1979), 어류의 생존과 성장 등에 가장 큰 영향을 미치는 외부 환경인자로 간주되고 있다. 계절 변화와 조명 등에 따른 광주기 변화 역시 어류의 생체 리듬에 영향을 미치는 외부 환경인자로서(Biswas and Takeuchi 2002), 어류의 성장과 생식소 성숙 그리고 호르몬 활성 등 많은 생리학적 특성(Björnsson 1997; Porter et al. 1998; Simensen et al. 2000)에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

대구(*Gadus macrocephalus*)는 우리나라 전 해역 그리고 오힌호츠크해, 베링해 및 알라스카만을 따라 남쪽으로 북미 캘리포니아 연안까지 광범위한 해역에 분포하는 냉수성 어종으로서(박과 광 2009; Westrheim 1996), 우리나라에서 중요한 해양생물 자원이다. 수온과 광주기와 같은 외부 환경인자 변화에 따른 대구의 생리반응에 관한 정보는 아직 밝혀지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 어류의 대사생리 반응에 가장 큰 영향을 미치는 수온과 광주기 변화에 따른 어체 내 반응률을 파악함으로써 대구의 생리적 자료 수집에 목적이 있다.

## 2. 재료 및 방법

### 실험어 및 순치

실험어는 경상남도 수산자원연구소에서 사육 중인 대구 치어를 사용하였다. 산소 소비율을 측정하기 전 실험어 [71.5±1.2 g(mean±SE, 습중량)]는 1,000 l FRP 수조와 침지식 생물여과조(1.0×1.5×2.0 m, 3.0 ton)로 이루어진 소형 실내 순환여과식 시설에 100마리를 옮겨 2주 동안 순치시켰다. 순치기간 동안 실험어는 시판용 해산어 상품사료(E-hwa Feed Co., Korea, 단백질 함량 46.7%)와 굴 성체를 적당한 크기로 잘라서 일간 어체중의 1.0~1.5%를 공급하였으며, 히터와 냉각기를 이용하여 수온을 10.0±0.1°C로 유지하였고, 32-W 형광등을 이용하여 광주기를

12L:12D로 조절하였다. 사육수 내 용존산소는 유량 조절과 에어레이션을 통해 80% 이상의 포화상태를 유지하였다. 순치기간 동안 사육수의 pH는 8.2±0.1, 염분은 34.0±0.3 psu를 유지하였다.

### 실험 장치

대구 치어의 산소 소비율 측정은 저수탱크(reservoir), 공급탱크(head tank), 산소 측정실, 호흡실 및 카트리지 필터로 이루어진 폐쇄 순환형 시스템(오와 노 2006)을 이용하였다. 공급탱크와 저수탱크 내에는 2~3개의 에어스톤을 블로워에 연결하여 95% 이상의 산소 포화도를 유지하였고, 실험 수온을 유지하기 위해 자동 온도 조절 장치가 연결되어 있는 히터와 냉각기를 설치하였다. 순환수는 저수탱크에서 양수되어 공급탱크로 들어가기 전에 1 µm의 카트리지 필터 1개를 연속적으로 거치도록 하여 입자성 부유물질의 영향을 최소화하였다. 실험기간 동안 시스템 내에 생성된 미생물에 의한 미량의 산소 소비를 줄이기 위해 유수식 자외선 살균기(Model: P301, 처리 용량 3 ton/hr, 삼지통상)를 통과하여 재순환하도록 하였다. 용존산소의 측정은 실험어가 수용된 호흡실 전인 공급탱크 내에, 그리고 호흡실을 거친 후 설치된 산소 측정실에 각각 산소 probe를 설치하여 연속적으로 측정되도록 하였다. 유속은 호흡실 유입수와 배출수간 용존산소 농도 차이가 최소한 0.2 mg/l이 되도록 유지하였으며(오와 노 2006), 평균 유량은 601.2±4.5 l/h이었다.

### 실험 방법

실내 수조에 순치된 실험어를 다시 200 l 유리수조 3개와 침지식 생물여과조(1.2×1.0×1.0 m, 1.2 ton)로 구성된 순환여과식 시스템 4 set, 총 12개의 유리수조에 8마리씩 분산 수용하였다. 실험어 수용 후 모든 수조는 10°C를 유지하였다. 실험 수온은 7, 10, 13 그리고 16°C로 설정하였으며, 10°C 실험구 1 set를 제외한 7°C와 13°C 실험구는 10°C로부터 3일간에 걸쳐 낮추거나 높였고, 16°C 실험구 1 set는 6일간에 걸쳐 수온을 높였다. 광주기는 각 실험 수온 조건에서 24L:0D, 12L:12D 그리고 0L:24D로 달리하여 처리하였다. 즉, 실험 수온과 12L:12D 조건으로 순치된 각 set 내 세 수조 중 두 수조는 24L:0D와 0L:24D로 즉각적으로 변화시켰으며(Jonassen et al. 2000), 나머지 한 수조는 그대로 유지하였다.

수온과 광주기 조절이 이루어진 후 실험어를 10일 이상 각 실험 조건에 추가 순치시켰다. 순치기간 중 먹이는 상품사료와 굴 성체를 하루에 어체중의 0.5~0.6% 비율로 공급하였다. 실험 시작 전 2일간 절식시킨 후 2-phenoxyethanol(Sigma, St. Louis, MO, USA)로 마취시켜 무게를 측정한 후 순치된 실험 조건의 호흡실에 수용하였

다. 유리수조와 호흡실의 압조건은 별도로 제작된 차광막을 이용하여 빛을 차단하였고, 명조건은 32-W 형광등을 이용하여 유도하였다. 실험어의 체중은  $79.9 \pm 2.0$  g이었으며, 호흡실에 각각 2마리씩 3반복 수용하여 실험을 실시하였다.

호흡실에 수용한 후 handling에 의한 영향을 배제하기 위하여 3시간 동안 안정시킨 후 그 후 24시간 동안 산소 소비율을 측정하였다(오와 노 2006).

**용존산소량 측정 및 자료 처리**

용존산소량의 측정은 호흡실 전후에 설치된 산소 측정 probe와 자료 저장 장치인 Multi Data Logger System (Oxyguard, Denmark)을 사용하였다. 호흡실 유입수와 배출수의 용존산소 농도는  $\mu$ Log VL 100 Software를 이용하여 5분마다 측정됨과 동시에 산소 측정 판넬을 통해 Data Logger에 저장되었다. 이들 자료를 프로그램을 통해 다운로드하여 분석에 이용하였다. 실험어의 산소 소비율 (oxygen consumption rate, OCR)은 Jobling (1982)이 보고한 다음과 같은 방법에 따라 구하였다.

$$OCR \text{ (mg O}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ h}^{-1}) = (C_i - C_o) \times Q/W$$

여기서,  $C_i$ : 어류 호흡실 유입수의 용존산소 농도(mg/l)  
 $C_o$ : 어류 호흡실 배출수의 용존산소 농도(mg/l)

Q: 어류 호흡실을 지나가는 시간당 유량(l/h)

W: 호흡실 수용 어체중(kg)

계산된 산소 소비율은 1시간 단위로 pooling 하여 일간 산소 소비율 패턴과 시간당 평균 산소 소비율을 구하였으며, 수온 변화에 따른 대구 치어의 민감도를 파악하기 위하여 다음 식(Wuenschel et al. 2005)과 같이  $Q_{10}$  값을 구하였다.

$$Q_{10} = \left[ \frac{R_2}{R_1} \right]^{(10/T_2 - T_1)}$$

여기서,  $R_1$ 과  $R_2$ 는 수온  $T_1$ 과  $T_2$ 일 때의 평균 산소 소비율

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 조건별 대사작용에 의한 에너지 소비율을 구하였다.

모든 자료의 통계처리는 SPSS 11.5(SPSS Inc., USA) 통계 프로그램으로 분산분석(ANOVA)를 실시하여 Duncan's multiple range test로 평균간 유의성( $P < 0.05$ )을 검정하였다. 각 수온과 광주기(12L:12D 조건의 명기와 암기 포함)에 따른 시간당 평균 산소 소비율은 one-way ANOVA를, 그리고 두 인자의 복합 영향은 two-way ANOVA를 통해 검정하였다.

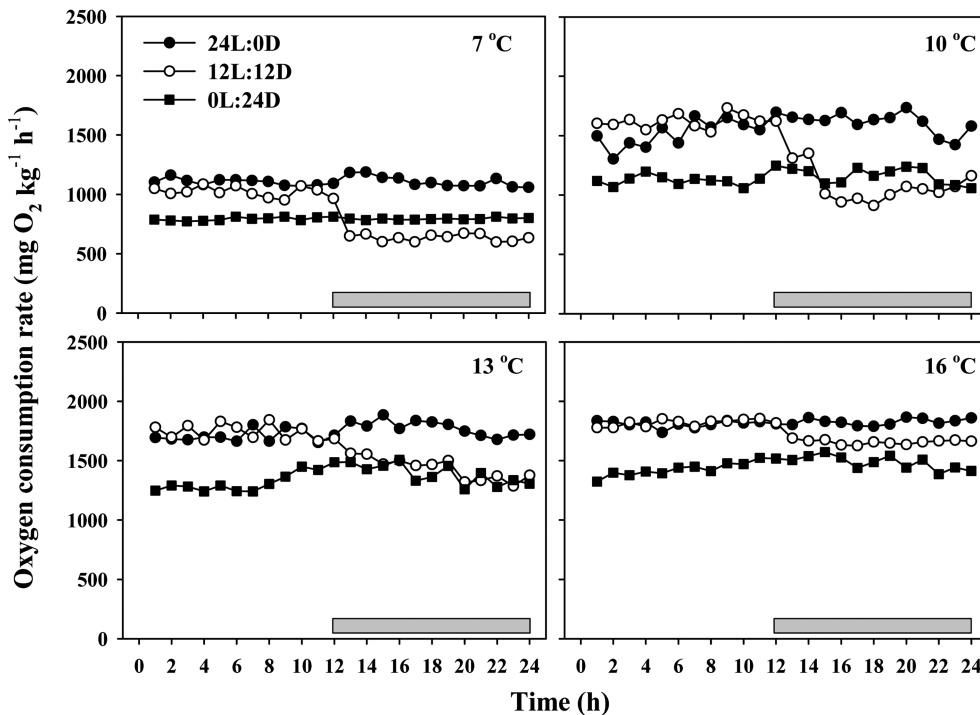


Fig. 1. Diurnal patterns of oxygen consumption rate in juvenile Pacific cod *Gadus macrocephalus* over a 24-hour period under different water temperatures and photoperiods. The dashed bar represents night period. Values represent mean of triplicate experiments.

**Table 1. Effect of temperature (T) and photoperiod on oxygen consumption rate (OCR) of the juvenile Pacific cod *Gadus macrocephalus***

Photoperiod	24L:0D	12L:12D	0L:24D		
Temperature (°C)	mg O <sub>2</sub> kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>				
7	1108.4±16.7 <sup>a(a)**</sup>	828.1±8.0 <sup>a(b)</sup>	793.7±2.0 <sup>a(b)</sup>		
10	1570.3±0.9 <sup>b(a)</sup>	1352.6±3.0 <sup>b(b)</sup>	1145.7±11.2 <sup>b(c)</sup>		
13	1742.5±6.9 <sup>c(a)</sup>	1587.3±9.7 <sup>c(b)</sup>	1352.8±7.9 <sup>c(c)</sup>		
16	1818.6±8.7 <sup>d(a)</sup>	1737.8±8.8 <sup>d(b)</sup>	1458.2±10.8 <sup>d(c)</sup>		
Regression	OCR=668.24+77.66T (r <sup>2</sup> =0.86, P<0.0001)	OCR=240.95+98.75T (r <sup>2</sup> =0.91, P<0.0001)	OCR=342.77+73.64T (r <sup>2</sup> =0.98, P<0.0001)		
Two-way ANOVA					
	d.f.	SS	MS	F	P
Temperature	3	3076629	1025543	3618.58	0.000
Photoperiod	2	828931	414465	1462.42	0.000
Temperature × Photoperiod	6	60016	10003	35.29	0.000
Error	24	6802	283		

\*Values (mean±SE) with different superscripts within the same column are significantly different (n=3, P<0.001)

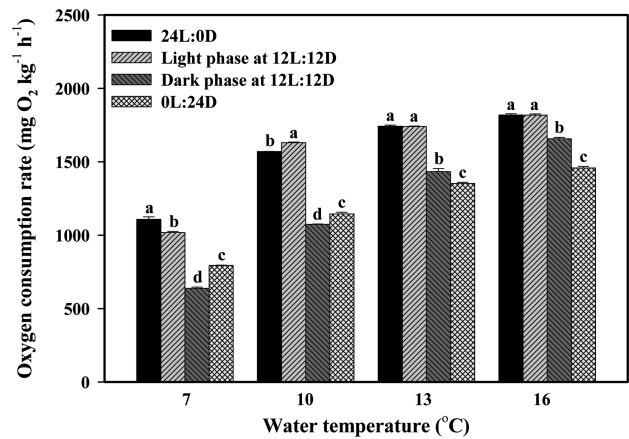
\*\*Values (mean±SE) with different superscripts in parentheses within the same row are significantly different (n=3, P<0.001)

### 3. 결 과

수온과 광주기에 따른 대구 치어의 시간당 평균 산소 소비율의 일간 변화 패턴과 그 결과를 각각 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다. 연속 명기 조건(24L:0D)과 연속 암기 조건(0L:24D)의 일간 산소 소비율 패턴의 경우 동일 수온 조건에서 큰 변화가 없었지만, 12시간 명기와 12시간 암기 조건(12L:12D)의 경우 모든 수온 조건에서 명기에서 암기로 변화하면서 산소 소비율이 감소하는 경향을 보였다(Fig. 1).

수온에 따른 시간당 평균 산소 소비율은 24시간 연속 명기 조건(24L:0D)의 경우 7, 10, 13 그리고 16°C에서 각각 1108.4, 1570.3, 1742.5 그리고 1818.6 mg O<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> 이었고, 12시간 명기와 12시간 암기 조건(12L:12D)의 경우 각각 828.1, 1352.6, 1587.3 그리고 1737.8 mg O<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>이었으며, 24시간 암기 조건(0L:24D)의 경우 각각 793.7, 1145.7, 1352.8 그리고 1458.2 mg O<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>이었다. 수온(T)에 따른 대구 치어의 시간당 평균 산소 소비율(OCR)은 24L:0D, 12L:12D 그리고 0L:24D의 광주기 조건에서 각각 OCR=668.24+77.66T(r<sup>2</sup>=0.86, P<0.0001), OCR=240.95+98.75T(r<sup>2</sup>=0.91, P<0.0001) 그리고 OCR=342.77+73.64T(r<sup>2</sup>=0.98, P<0.0001)의 회귀식을 보였다(Table 1). 따라서 동일 광주기 조건에서 수온이 높아질수록 시간당 평균 산소 소비율은 유의하게 증가하였다(P<0.001).

동일한 수온 조건에서 광주기에 따른 시간당 평균 산소 소비율의 경우 24L:0D 조건이 가장 높았고, 다음으로



**Fig. 2. Oxygen consumption rates of juvenile Pacific cod *Gadus macrocephalus* under different water temperatures and photoperiods. Values (mean±SE) with different letters at same water temperature are significantly different (n=3, P<0.001).**

12L:12D와 0L:24D 순이었지만(P<0.001), 7°C의 경우 12L:12D 조건과 0L:24D 조건은 유의적인 차이를 보이지 않았다(Table 1, P>0.05). 명기와 암기가 반복(12L:12D)될 경우 시간당 평균 산소 소비율은 수온 7, 10, 13 그리고 16°C에서 명기시 각각 1018.0, 1630.3, 1741.1 그리고 1818.3 mg O<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>로서, 암기시(각각 638.1, 1074.9, 1433.4 그리고 1657.4 mg O<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>) 보다 유의하게 높았다(Fig. 2, P<0.001). 따라서 명기와 암기가 반복될 때, 대구 치어의 시간당 평균 산소 소비율은 명기시에 비해 암기시 유의하게 감소하였다.

이상의 결과에서 대구 치어의 시간당 평균 산소 소비율은 수온이 높아질수록 유의하게 증가하였고( $P<0.001$ ), 모든 수온 조건에서 연속 명기일 때 가장 높았으며, 명기와 암기가 반복될 때 명기에서 증가하고 암기에서 감소하는 일주기 리듬을 보였다. 따라서 수온( $P=0.000$ ), 광주기( $P=0.000$ ) 그리고 두 인자의 상호작용( $P=0.000$ ) 모두가 대구 치어의 산소 소비율에 유의한 영향을 미쳤다(Table 1).

대구 치어의 수온과 광주기에 따른 대사 에너지 소비율을 Fig. 3에 나타내었다. 수온에 따른 일간 평균 대사 에너지 소비율은 24L:0D 조건의 경우 7, 10, 13 그리고 16°C에서 각각 755.9, 1072.3, 1190.1 그리고 1247.0  $\text{kJ kg}^{-1} \text{d}^{-1}$ 이었고, 12L:12D 조건의 경우 각각 565.9, 923.7, 1084.4 그리고 1186.7  $\text{kJ kg}^{-1} \text{d}^{-1}$ 이었으며, 0L:24D 조건의 경우 각각 542.1, 782.6, 929.1 그리고 996.1  $\text{kJ kg}^{-1} \text{d}^{-1}$ 로 나타나, 수온 상승과 연속 명기 조건에서 높은 대사 에너지 소비율을 보였다( $P<0.001$ ).

수온과 광주기에 따른 대구 치어의  $Q_{10}$  값은 Table 2에 나타내었다. 수온 7~10°C 구간의  $Q_{10}$  값은 24L:0D, 12L:12D 그리고 0L:24D에서 각각 3.19, 5.13 그리고 3.40이었으며, 10~13°C 구간에서 각각 1.41, 1.70 그리고 1.74

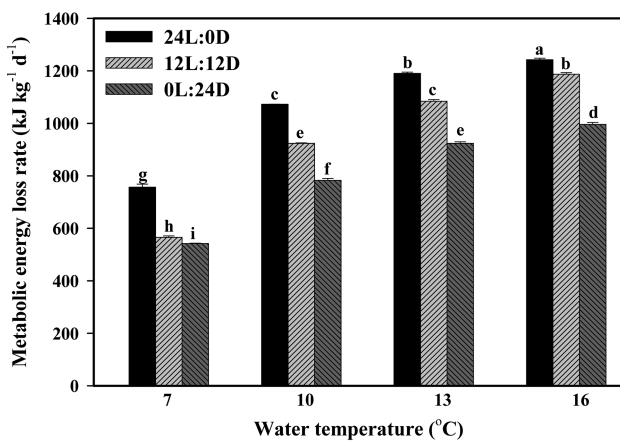


Fig. 3. Metabolic energy loss rate of juvenile Pacific cod *Gadus macrocephalus* subjected to different water temperatures and photoperiods. Values (mean±SE) with different letters are significantly different ( $n=3$ ,  $P<0.001$ ).

Table 2.  $Q_{10}$  value of juvenile Pacific cod *Gadus macrocephalus* under different water temperature ranges and photoperiods

Photoperiod	Water temperature interval (°C)			
	7~10	10~13	13~16	7~16
24L:0D	3.19	1.41	1.15	2.41
12L:12D	5.13	1.70	1.35	3.73
0L:24D	3.40	1.74	1.28	2.95

이었고, 13~16°C에서 각각 1.15, 1.35 그리고 1.28로 나타나, 7~10°C 구간에서 가장 높았다. 각 수온 범위에서 광주기에 따른  $Q_{10}$  값은 12L:12D(10~13°C 제외)에서 가장 높은 반면, 24L:0D에서 가장 낮은 값을 보였다. 전 수온 범위(7~16°C)의  $Q_{10}$  값 역시 12L:12D 조건에서 3.73으로, 24L:0D(2.41)와 0L:24D(2.95) 조건에 비해 높은 값을 보였다.

#### 4. 고 찰

어류와 같은 변온동물의 성장, 먹이 섭취에 따른 소화, 산소 소비 및 대사 노폐물의 배설 등과 같은 대사 반응은 수온에 직접적인 영향을 받으며, 일반적으로 서식 수온 범위 내에서 온도 상승에 따라 직선적으로 증가한다(Forsberg and Summerfelt 1992; Tytler and Calow 1985). 본 실험 결과 수온 상승은 대구 치어의 대사율을 증가시키는 인자로 작용하였으며, 이전의 연구 결과와 일치하였다(Hanna et al. 2008; Paul et al. 1988). Paul et al. (1988)은 185~225 g의 *G. macrocephalus*를 대상으로 수온을 3.5°C에서 7°C로 상승시킬 경우 수온 상승에 따라 산소 소비율은 직선적[ $\text{OCR}(\mu\text{l O}_2 \text{ g}^{-1} \text{ h}^{-1})=23.45+4.789T$ ,  $r^2=0.99$ ]으로 증가한다고 보고하였으며, Hanna et al. (2008)은 성어(평균 무게 1.5 kg)를 대상으로 4°C에서 11°C로 상승할 경우 28% 산소 소비율이 증가한다고 보고하였다. Schurmann and Steffensen (1997)은 같은 속 어류인 대서양대구(*Gadus morhua*)를 대상으로 한 실험에서 5°C 상승할 경우 61% 산소 소비율이 증가하며, Pérez-Casanova et al. (2008) 역시 10°C에서 22°C로 상승할 경우 2.8배 증가한다고 보고하였다. 오 등 (2009)은 대구와 같은 냉수성 어종인 강도다리(*Platichthys stellatus*) 치어(평균 무게 37.4 g)를 대상으로 수온 4°C에서 19°C로 상승할 경우 약 2.6배 증가한다고 보고하였다. Jonassen et al. (2000) 역시 냉수성 어종인 Atlantic halibut (*Hippoglossus hippoglossus*) 치어(평균 무게 11.6 g)를 대상으로 수온 6°C에서 12°C로 상승할 경우 약 1.3~1.4배 증가한다고 보고하였다. 본 실험의 경우 수온이 7°C에서 16°C로 상승할 경우 광주기 조건에 따라 약 1.6~2.6배 대사율이 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 차이는 실험 종, 크기, 실험 수온, 광주기, 절식 기간 그리고 산소 소비율의 측정 방법 및 시스템 등에 기인한 것으로 판단된다.

광주기 변화 역시 대구 치어의 산소 소비율에 영향을 미쳤다. 본 실험 결과 명기가 지속될 경우 가장 높은 산소 소비율을 보였으며, 이것은 참매기 *Silurus asotus*(조와 김 1999)와 돌돔 *Oplegnathus fasciatus*(오 등 2006)의 결과와 일치하였다. 이들 어종의 경우 수온 상승과 상관없이 명기가 지속될 때(24L:0D) 가장 높은 산소 소비율을 보였

으며, 다음으로 12L:12D 그리고 0L:24D 순으로 나타나 본 실험 결과와 일치하였다. 그러나 볼락(*Sebastes inermis*)의 경우 수온 상승시 24L:0D 조건보다 12L:12D 조건에서 더 높은 산소 소비율을 보여(오와 노 2006) 본 실험과 차이를 보였지만, 명기시의 산소 소비율이 암기시 보다 항상 높은 결과를 보였다. Imsland et al. (1995)은 turbot (*Scophthalmus maximus*)을 대상으로 한 실험에서 24L:0D 조건이 자연 광주기 조건과 16L:8D 조건보다 높은 산소 소비율을 보인다고 보고하였고, 지속적인 명기 조건은 어류의 유영 등 움직임을 높이기 때문이라고 고찰하였다. 본 실험 역시 지속적인 명조건의 경우 대구 치어의 활발한 움직임을 관찰할 수 있었지만, 지속적인 암조건의 경우 호흡실 내 바닥에서 거의 움직임이 없는 상태를 유지하는 것으로 보아 명암이 대구 치어의 활동성에 직접적인 영향을 미치는 것으로 생각된다. 이 밖에 Björnsson (1997)은 연어를 대상으로 실험한 결과 수온에 상관없이 광주기의 변화가 체내 성장 호르몬의 분비 등 대사회전(turnover)을 높여 산소 소비율을 증가시킨다는 보고도 있어, 이에 대한 연구가 앞으로 필요하다.

대구 치어의 수온과 광주기에 따른 일간 산소 소비율 패턴의 경우 연속 명기 또는 암기 조건은 큰 변화를 보이지 않은 반면, 12L:12D 조건은 명기에서 산소 소비율이 증가하고 암기에서 산소 소비율이 감소하는 일주기 리듬을 보였다(Fig. 1과 2). 이것은 광주기의 변화가 없는 연속 명기 또는 암기 조건의 경우 어체의 안정적인 상태를 유지하는 반면, 명기와 암기가 반복될 경우 체내 생리적 반응 및 행동 양상에 영향을 미쳐 나타난 것으로 생각된다. 이와 같은 현상은 볼락(오와 노 2006), 돌돔(오 등 2006) 그리고 참메기(조와 김 1999)에서도 보고되었으며, 참메기의 경우 암조건에서 더욱 안정적인 상태를 유지하는 것으로 나타났다. Biswas et al. (2002)은 나일틸라피아(*Oreochromis niloticus*)를 대상으로 3L:3D, 6L:6D, 12L:12D 그리고 24L:24D의 광주기 조건에서 산소 소비율을 조사한 결과 12L:12D에서 가장 확실한 일주기 리듬을 보인 반면, 3L:3D 조건의 경우 빈번한 광주기 변화 때문에 일정한 일주기 리듬을 보이지 않는다고 보고하였다. Atlantic halibut 치어의 경우 수온 6°C와 12°C 조건에서 자연 광주기 조건으로 실험한 결과 명기보다는 암기 조건에서 더 높은 산소 소비율을 보여 본 실험과 반대의 현상을 보였지만, 역시 광주기 변화에 따른 일주기 리듬이 나타났다(Jonassen et al. 2000). 따라서 광주기가 어류 체내 생체 리듬에 영향을 줄 수 있는 생체시계(zeitgeber) 역할을 하는 것으로 판단되며, 이전의 연구 결과와 일치하였다(Biswas and Takeuchi 2002; Ross and McKinney 1988).

어류의 산소 소비와 같은 대사 활동은 많은 에너지를 사용하며, 성장 및 생존 등에 필요한 에너지수지에 있어

상당한 부분을 차지한다(Adams and Breck 1990). 본 실험 결과 수온과 광주기 변화는 어류의 대사 에너지 소비율 상승에 주된 원인이었으며, 이전의 연구 결과와 일치하였다(조와 김 1999; 오 등 2006; Jonassen et al. 2000). 본 실험 결과 연속 명기 조건에서 높은 에너지 소비율을 보인 반면, Biswas et al. (2002)은 나일틸라피아의 경우 광주기 3L:3D와 6L:6D 조건이 12L:12D 조건보다 각각 20%와 14% 더 높은 에너지를 소모하였다고 보고하였다. 이들은 빈번한 명암의 변화가 체내 생리 반응을 가속화시켜 어류의 활동성 또는 생체 리듬에 영향을 미쳐 더 많은 에너지를 소비할 수 있다고 고찰하였다.

$Q_{10}$  값은 수온 상승으로 유발된 체내 생화학적 반응의 적응을 위한 수서동물의 에너지 요구량을 나타낸다(Spanopoulos-Hernández et al. 2005). 본 실험이 이루어진 7~16°C 범위에서 광주기에 따라  $Q_{10}$  값은 2.41~3.73으로 나타나, 다른 어종에서 일반적으로 보고된 2~3 범위(Fry 1971)와 유사하였다. 동일 어종을 대상으로 한 실험에서 Hanna et al. (2008)은 성어(1.5 kg)의 경우 4°C에서 11°C로 상승할 경우 1.5의  $Q_{10}$  값을 보고하였고, Paul et al. (1988)은 미성어(185~225 g)의 경우 3.5~7°C 범위에서 2.5의  $Q_{10}$  값을 보고하였다. Schurmann and Steffensen (1997)은 같은 속 어류인 대서양대구(26~35 g)를 대상으로 5~15°C 범위에서 2.12의  $Q_{10}$  값을 보고하였고, Soofiani and Priede (1985)는 31.5 g의 대서양대구를 대상으로 7~15°C 범위에서 1.93의  $Q_{10}$  값을 보고하였다. Laurence (1978)는 36.0~2684.8 µg의 대서양대구를 대상으로 4~10°C 범위에서 5.31의 높은  $Q_{10}$  값을 보고한 바 있다. 이와 같은 차이는 실험이 이루어진 수온 범위, 실험 방법, 어종, 크기 및 순치 조건 등에 기인한 것으로 생각된다. 본 실험 결과 가장 낮은 수온 범위인 7~10°C 범위에서 가장 높은  $Q_{10}$  값(3.19~5.13)을 보였으며, 이전의 대서양대구(Saunders 1963), Gray snapper *Lutjanus griseus* (Wuenschel et al. 2005) 그리고 볼락(오와 노 2006)의 결과와 유사하였다. 따라서 대구 치어는 수온이 상승하기 시작하는 봄철에 높은 대사율 증가가 예상되며, 이에 따른 적절한 용존산소 관리와 에너지 손실에 따른 먹이 공급이 충분이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

이상의 결과에서 수온과 광주기는 대구 치어의 대사율에 직접적인 영향을 미치는 대사조절인자로 작용하였으며, 각 인자에 따른 정량적 대사율은 시스템 내 용존산소 요구량 및 사료 내 에너지 요구량 등 대구 치어 사육 관리를 위한 기본적인 정보로 활용할 수 있을 것이다.

## 5. 요약 및 결론

대구(*Gadus macrocephalus*) 치어의 수온과 광주기에

따른 대사율을 조사하기 위해 산소 소비율을 조사하였다. 절식한 대구 치어(평균 무게  $79.9 \pm 2.0$  g)를 대상으로 네 가지 수온(7, 10, 13,  $16^{\circ}\text{C}$ )과 세 가지 광주기(24L:0D, 12L:12D, 0L:24D) 조건에서 폐쇄 순환형 호흡 측정 시스템을 이용하여 24시간 동안 5분 간격으로(3반복) 산소 소비율을 측정하였다. 모든 광주기 조건에서 수온 상승에 따라 산소 소비율은 유의적으로 증가하였다( $P < 0.001$ ). 수온 7, 10, 13 그리고  $16^{\circ}\text{C}$ 에서의 시간당 평균 산소 소비율은 각각  $793.7 \sim 1108.4$ ,  $1145.7 \sim 1570.3$ ,  $1352.8 \sim 1742.5$  그리고  $1458.2 \sim 1818.6$   $\text{mg O}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 로 나타났다. 모든 수온 조건( $7^{\circ}\text{C}$  제외)에서 연속 명기(24L:0D) 조건이 가장 높은 산소 소비율을 보였으며, 다음으로 12L:12D와 0L:24D순이었으며( $P < 0.001$ ), 12L:12D 조건의 명기에서의 산소 소비율은 같은 조건의 암기 때보다 유의하게 높은 산소 소비율을 보였다( $P < 0.001$ ).  $Q_{10}$  값은 7~10, 10~13 그리고 13~ $16^{\circ}\text{C}$  범위에서 각각 3.19~5.13, 1.41~1.74 그리고 1.15~1.35이었다. 이상의 결과에서 수온과 광주기 그리고 두 인자의 상호작용 모두가 대구 치어의 산소 소비율에 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 본 연구 결과는 대구 치어 사육을 위한 시스템 내 용존산소 요구량을 추정하고 관리 방안을 구축하는데 필요한 정보를 제공한다.

## 사 사

본 연구는 농림수산식품부 수산특정연구개발사업인 “외해 심층가두리를 이용한 대구·참치 등 양식기술개발(PM55350)” 과제와 “통영 MRC(해양생물자원보존연구센터)를 기반으로 한 남해 연안 해양생물자원 증 보존 및 활용 연구(PK07780)” 과제 그리고 “이산화탄소 증가에 따른 해양어류와 무척추동물의 생리·생태 변화 진단 및 예측(PE98523)” 과제의 지원에 의해서 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 박충열, 곽우석 (2009) 우리나라 연안에 서식하는 대구 (*Gadus macrocephalus*)의 위 내용물 비교. *한국어류학회지* **21**:28-37
- 오승용, 노충환 (2006) 수온과 광주기에 따른 불락, *Sebastes inermis* 치어의 산소 소비율. *한국양식학회지* **19**:210-215
- 오승용, 노충환, 강래선, 명정구 (2006) 들돔, *Oplegnathus fasciatus* 치어의 절식시 산소 소비율에 미치는 수온과 광주기의 영향. *Ocean and Polar Res* **28**:407-413
- 오승용, 장요순, 노충환, 최희정, 명정구, 김종관 (2009) 강도다리 *Platichthys stellatus*의 산소 소비율에 미치는 수온과 체중의 영향. *한국어류학회지* **21**:7-14
- 조재윤, 김유희 (1999) 참메기, *Silurus asotus*의 수온과 광주기 변화에 따른 산소 소비량. *한국수산학회지* **32**:56-61
- Adams SM, Breck JE (1990) Bioenergetics. In: Schreck CB, Moyle PB (eds) *Methods for fish biology*. American Fisheries Society, Bethesda, pp 389-415
- Biswas AK, Endo M, Takeuchi T (2002) Effect of different photoperiod cycles on metabolic rate and energy loss of both fed and unfed young tilapia *Oreochromis niloticus*: Part I. *Fish Sci* **68**:465-477
- Biswas AK, Takeuchi T (2002) Effect of different photoperiod cycles on metabolic rate and energy loss of both fed and unfed adult tilapia *Oreochromis niloticus*: Part II. *Fish Sci* **68**:543-553
- Björnsson BT (1997) The biology of salmon growth hormone: from daylight to dominance. *Fish Physiol Biochem* **17**:9-24
- Brett JR, Groves TDD (1979) Physiological energetics. In: Hoar WH, Randall DJ, Brett JR (eds). *Fish Physiology*. Academic Press, New York, pp 279-352
- Dalla Via J, Villani P, Gasteiger E, Niederstätter H (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, Gallagher ML, Meltzer A (1989) The influence of body size and temperature on oxygen consumption of the European eel, *Anguilla anguilla*. *J Fish Biol* **34**:19-24
- Elliot JM, Davison W (1975) Energy equivalents of oxygen consumption in animal energetics. *Oecologia* **19**:195-201
- Forsberg JA, Summerfelt RC (1992) Effects of temperature on dial ammonia excretion of fingerling walleye. *Aquaculture* **102**:115-126
- Fry FEJ (1971) The effect of environmental factors on the physiology of fish. In: Hoar WS, Randall DJ (eds) *Fish Physiology*. Academic Press, New York, pp 1-98
- Hanna SK, Haukenes AH, Foy RJ, Buck CL (2008) Temperature effects on metabolic rate, swimming performance and condition of Pacific cod *Gadus macrocephalus* Tilesius. *J Fish Biol* **72**:1068-1078
- Imsland AK, Folkvor A, Stefansson SO (1995) Growth, oxygen consumption and activity of juvenile turbot (*Scophthalmus maximus* L.) reared under different temperatures and photoperiods. *Neth J Sea Res* **34**:149-159
- Jobling M (1982) A study of some factors affecting rates of oxygen consumption of plaice, *Pleuronectes platessa* L. *J Fish Biol* **20**:501-516

- Jonassen TM, Imsland AK, Kadowaki S, Stefansson SO (2000) Interaction of temperature and photoperiod on growth of Atlantic halibut *Hippoglossus hippoglossus* L. *Aquac Res* **31**:219-227
- Kaushik SJ (1998) Nutritional bioenergetics and estimation of waste production in non-salmonids. *Aqua Liv Res* **11**:211-217
- Kita J, Tsuchida S, Setoguma, T (1996) Temperature preference and tolerance and oxygen consumption of the marbled rock-fish, *Sebastes marmoratus*. *Mar Biol* **125**:467-471
- Laurence GC (1978) Comparative growth, respiration and delayed feeding abilities of larval cod (*Gadus morhua*) and haddock (*Melanogrammus aeglefinus*) as influenced by temperature during laboratory studies. *Mar Biol* **50**:1-7
- Lyytikäinen T, Jobling M (1998) The effects of temperature fluctuations on oxygen consumption and ammonia excretion of underyearling Lake Inari Arctic charr. *J Fish Biol* **52**:1186-1198
- Paul AJ, Paul JM, Smith RL (1988) Respiratory energy requirements of the cod *Gadus macrocephalus* Tilesius relative to body size, food intake, and temperature. *J Exp Mar Biol Ecol* **122**:83-89
- Pérez-Casanova JC, Afonso LOB, Johnson SC, Currie S, Gamperl AK (2008) The stress and metabolic responses of juvenile Atlantic cod *Gadus morhua* L. to an acute thermal challenge. *J Fish Biol* **72**:899-916
- Porter MJR, Randall CF, Bromage NR, Thorpe JE (1998) The role of melatonin and the pineal gland on development and smoltification of Atlantic salmon (*Salmo salar*) parr. *Aquaculture* **168**:139-155
- Ross LG, McKinney RW (1988) Respiratory cycles in *Oreochromis niloticus* (L.) measured using a six-channel microcomputer-operated respirometer. *Comp Biochem Physiol* **89**:637-643
- Saunders RL (1963) Respiration of the Atlantic cod. *J Fish Res Board Can* **20**:373-386
- Schurmann H, Steffensen JF (1997) Effects of temperature, hypoxia and activity on the metabolism of juvenile Atlantic cod. *J Fish Biol* **50**:1166-1180
- Simensen LM, Jonassen TM, Imsland AK, Stefansson SO (2000) Photoperiod regulation of growth of juvenile Atlantic halibut *Hippoglossus hippoglossus* L. *Aquaculture* **190**:119-128
- Soofiani NM, Priede IG (1985) Aerobic metabolic scope and swimming performance in juvenile cod, *Gadus morhua* L. *J Fish Biol* **26**:127-138
- Spanopoulos-Hernández M, Martínez-Palacios CA, Vanegas-Pérez RC, Rosas C, Ross LG (2005) The combined effects of salinity and temperature on the oxygen consumption of juvenile shrimps *Litopenaeus stylirostris* (Stimpson, 1874). *Aquaculture* **244**:341-348
- Tytler P, Calow P (1985) *Fish Energetics: New Perspectives*. Johns Hopkins University Press, Baltimore, 349 p
- Westheim SJ (1996) On the Pacific cod (*Gadus macrocephalus*) in British Columbia waters, and a comparison with Pacific cod elsewhere, and Atlantic cod (*G. morhua*). *Can Tech Res Fish Aquat Sci* **2092**:390
- Wuenschel MJ, Jugovich AR, Hare JA (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 MJ, Werner RG, Hoss DE (2004) Effect of body size, temperature and salinity on the routine metabolism of larval and juvenile spotted seatrout. *J Fish Biol* **64**:1088-1102

---

Received Jun. 29, 2010

Revised Jul. 20, 2010

Accepted Aug. 10, 2010