

# 굴 수평망식 양식장의 먹이가용성에 대한 연구

정우권<sup>1</sup>, 조상만<sup>2</sup>

<sup>1</sup>경상대학교 양식생명과학과, <sup>2</sup>군산대학교 해양생명과학과

## Food availability of the Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, cultured in intertidal rack culture system

Woo-Geon Jeong<sup>1</sup> and Sang-Man Cho<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Aquaculture Science & Institute of Marine Industry, Gyeongsang National University, Tongyeong 53064, Korea

<sup>2</sup>Department of Aquaculture and Aquatic Sciences, Kunsan National University, Kunsan 54150, Korea.

### ABSTRACT

To optimize the growth performance for oyster rack culture in tidal flat, the scope for growth (SFG) and food availability (FA) were estimated from primary production and the metabolic rates of the oysters cultured on the northeastern coast of Wando Island, Korea. The estimated unit energy content of the seawater ranged from 1.18 to 25.39 Kcal/m<sup>3</sup>/day in typical productive features of the temperate zone. The absorbed energy allocated in the order of respiration (15.9-97.3%), meat growth (0-70%) and shell growth (0.9-31.8%), respectively. Scope for growth (SFG) ranged from -2.2 to 45.0 Kcal/m<sup>3</sup>/day regulated by mainly temperature and salinity. Food availability (FA) ranged from 1.1 to 329 which met food requirements resulting in no mortality. Between the late spring and summer season, low FA resulted in food deficiency and further served as a factor for mortality when especially coupled with physical stress such as typhoons. The energetic cost of reproduction inferred from summer mortality corresponded to 15% for one year-old and 60% for 2 year-old oyster. Our results indicated that one of the factors for effective oyster culture, stocking time should be determined upon consideration of spat size. Small-sized spats in shell height should introduce in spring but large-sized (> 5 cm) in autumn to achieve the commercial oyster before next summer without significant mortality.

**Key words:** Pacific oyster, Food availability, Scope for growth, Tidal flat, Rack culture

### 서론

양식 이매패류의 먹이가용성은 양식 규모 및 생산성 등을 결정하는 중요한 요인으로 알려지고 있어 (Utting and Millican, 1997; Delaporte *et al.*, 2006), 환경 인자를 포함하여 연안의 이매패류 양식의 지속 가능성을 확보하는데 중요한 요인이다 (Saxby, 2002). 이매패류의 먹이가용성을 산정하는 것은 먹이원이나 연관 변수에 대한 제한된 정보로 인하여

현실적인 어려움이 있다 (Baldwin and Newell, 1991; Baldwin and Newell, 1995). 이러한 어려움에도 불구하고, 여과섭식 이매패류 양식장의 지속 가능한 최대 생산 (Maximum Sustainable Yield, MSY) 을 추구하기 위한 환경 수용력을 산정하기 위한 노력들은 지속되어 왔다 (Raillard and Ménesguen, 1994; McKindsey *et al.*, 2006; Jeong *et al.*, 2009). 환경용량에 따른 적정 수용력은 지속적이며 주기적으로 변화하는 양식환경을 고려할 때 단기간의 연구로 그 범위를 규정하는 것은 매우 어려운 일이다.

굴 양식장은 다량의 양식생물을 양성하여 수확하는 인위적인 경제활동이므로 자연 서식밀도보다 과밀하게 입식하므로 동종 간의 먹이 경쟁은 불가피하다 (Gilad, 2008). 따라서 밀식과 장기 연작은 오랜 관행으로 치부되어 왔으나, 이는 어장 노화 현상을 가속화시켜 양식장의 생산성을 저하시키고, 다양한 환경변화에 따른 자정능력의 변화가 발생하므로 적극적인 어장 환경관리가 요구되고 있다 (Choi *et al.*, 1991; Jeong, 1998). 따라서 지속 가능한 생산을 위해서는 어장노화 현상을

Received: September 10, 2021; Revised: September 23, 2021;  
Accepted: September 30, 2021

Corresponding author: Sang-Man Cho

Tel: +82 (63) 469-1839, e-mail: gigas@kunsan.ac.kr  
1225-3480/24797

This is an Open Access Article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License with permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproducibility in any medium, provided the original work is properly cited.

최소화할 수 있는 범위 내에서 생산이 이뤄져야 하며, 이런 범주에서 먹이 가용성 (Food availability, *FA*) 과 성장잠재력 (Scope for growth, *SFG*) 은 양식공정을 이해하고 최적화하는데 많은 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대한다.

이 연구는 완도 군외면 해역에 입식 시기를 달리하여 입식한 수평망식 양식 굴의 잠재성장력 (Scope for growth, *SFG*) 와 먹이가용성 (Food availability, *FA*) 추정하여 지속 가능한 양식 생산을 위한 양식 공정의 최적화하는데 일조하고자 하였다.

### 재료 및 방법

완도군 군외면 영흥리 지선 연안의 수평망식 굴 양식장에 2011년 4월, 2012년 6월 및 11월에 각각 100 개체/망의 밀도로 입식하였다 (Jeong and Cho, 2020). 수질 조사는 어장 주위 5개 정점에 대해서 실시하였으며 (Fig. 1), 기초생산력 측정은 PAR sensor (Li-193, LI-COR, NE) 와 Chlorophyll sensor (TriLux, Chelsea Technologies, UK) 를 장착한 연직 수질측정기 (Ocean Seven 310 CTD, Idronaut, Italy) 를 이용하여 수온, 염분, 용존산소량, 수중광량 및 클로로필을 측정하였고, 해면입사광량은 양식장 인근 주택가 옥상에 설치한 광량자 센서 (LI-190SA Quantum sensor, LI-COR Inc., NE) 에 데이터로거를 달아1시간 간격으로 측정하였다.

측정된 데이터는 Jeong and Cho (2018) 에 따라 기초생산력을 산정하였다. 한편, 굴 양식장의 망을 통과하는 수량은 조석류 진동주기 (372 min) 를 고려하여, 최대 유속 ( $V_x$ , m/min) 에 대한 사인함수의 평균값으로 평균 유속을 산정하였고, 조간대에 위치한 양식장의 특성을 고려하여 국립해양조사원의 조석 예보자료를 이용하여 월별 평균 노출시간을 적용하여 단위유동장 (S, 1 × 0.5 m) 을 통과하는 수량을 산정하였다. 망을 통과하는 수량에 Platt (1971) 의 에너지 전환계수를 적용한 기초생산 에너지 ( $PP_E$ ) 를 적용하였고, 아래와 같이 에너지함량 ( $V_{SE}$ ) 을 산정하였다 (Eq. 1).

$$V_{SE} = S \times \left[ \int_0^{372} V_x \times \sin\left(\pi \times \frac{t}{372}\right) / dt \right] \times (1440 - T_{em}) \times PP_E \text{ (Kcal/m}^3\text{/day)} \quad (1)$$

여과섭식성 굴의 섭취에너지는 굴의 여수율에 의해 결정되며, 양성이 지속되며 폐사가 진행됨에 따라 개체수가 달라지므로 밀도 효과를 고려하여야 한다. 개체당 여수율 ( $FR$ ) 은 Kim (1995) 에 따라 수온과 체중에 대한 관계식으로 산정하였고 (Eq. 2), 밀도에 따라 집단 여수율은 변하므로 밀도 효과를 고려하여 공급 량이 충분할 경우는 1, 그렇지 못할 경우는 유동장에 대한 여수 요구량의 비 ( $rF_i$ ) 로 나타내었다. 집단 유효

여과에너지 ( $V_E$ ) 는 기초생산에너지 ( $PP_E$ ), 개체 여수율 및 여수효율을 고려하여 산정하였다 (Eq. 3).

$$FR = \text{Exp}(0.208 - 4.324T) \cdot DW^{0.223} \text{ (kim, 1995)} \quad (2)$$

$$V_E = \int_1^n [(\Delta FR \cdot rF_i) \times (h_d - h_{ex})] \times 10^{-3} \times PP_E \text{ (Kcal/day)} \quad (3)$$

한편 섭취된 에너지중 동화에너지는 Kim *et al.* (2007) 의 동화율 (*abs. eff.*) 을 적용하여 산정하였다. 호흡 ( $E_r$ ) 과 폐각형성 ( $E_{Sh}$ ) 및 생식 ( $E_{rep}$ ) 에 소비되는 에너지는 Kim (1980) 에 따라 산정하였다. 증육에너지 ( $E_g$ ) 는 Bertalanffy 성장식을 각고-전증 관계식을 이용하여 총증량을 구하고, 비만지수 (*fatness*) 와 건조율 ( $d_r$ ) 을 곱하여 건조량으로 환산하였다. 한편 증육에너지 ( $E_g$ ) 는 Kim (1980) 에 따라 육질 에너지함량 ( $E_k$ ) 과 성장효율 ( $rG$ ) 을 적용하여 산정하였다 (Eq. 4).

$$E_g = \sum_1^n (\Delta W \times dr \times E_k \times rG) \text{ (Kcal/day)} \quad (4)$$

이상의 관계식을 통해 먹이가용성 (*FA*) 과 잠재성장력 (*SFG*) 은 양성망을 통과하는 해수의 에너지 함량 ( $V_{SE}$ ), 섭식 에너지 ( $V_E$ ), 대사에너지 등을 고려하여 산정하였다 (Eq. 5 and 6).

$$FA = V_{SE} / V_E \quad (5)$$

$$SFG = V_E \cdot \text{abs. eff} - (E_r + E_{Sh} + E_{rep} + E_g) \quad (6)$$

한편, 수온, 염분 및 노출시간 등의 변수간의 상관관계는 SigmaPlot (Version 13.0, Systat Software, Inc.) 를 이용하여 분석하였다.

### 결과 및 고찰

조사 해역의 수온은 4.3-28.0℃의 범위였고, 2012년 8월에 28.0℃로 가장 높았고, 2013년 1월이 4.3℃로 가장 낮았다. 완도해역은 겨울철에는 비교적 온화하고 여름철은 우리나라 주요 양식해역인 통영보다 수온이 낮아 굴 양식해역으로 적합한 해역으로 알려지고 있다 (Jeong and Cho, 2018). 조사해역의 염분 농도는 26.2-33.6 psu의 범위로 2012년 9월에 26.2 psu로 가장 낮았지만 굴의 대사에 심각한 영향을 미치는 수준은 아니었다. 통상적인 굴의 염분 내성 범위는 15-44 psu이지만 (Nell and Holliday, 1988), 염분변화에 삼투압을 유

지하기 위한 높은 대사 비용이 소요되고 심할 경우 대량 폐사로 이어지게 된다 (Brown and Hartwick, 1988, Gagnaire *et al.*, 2006). 조사해역은 완도와 고금도 사이의 좁은 협수로에 위치하고 있어 조류 소통이 양호하고, 해역으로 유입되는 큰 하천이 없어 염분 농도의 변화가 적어 연중 적정 범위를 유지하므로 염분의 영향은 무시할 수준이었다 (Jeong and Cho, 2018).

일반적으로 저산소 환경 (1.5 mg/L 이하) 및 무산소환경 (0.07 mg/L 이하)에서는 유생의 부착 저해 및 유폐 성장 등에 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다 (Baker and Mann, 1992). 또한 굴은 호흡을 조절할 수 있는 능력이 낮아, 저산소 환경에 노출될 경우 대사작용에 악영향을 줄 수 있다 (Le Moullac *et al.*, 2007). 조사 해역의 DO는 4.5-10.2 mg/L의 범위로 (평균  $7.3 \pm 1.4$  mg/L) 여름철에 다소 낮았지만 굴의 대사작용에 영향을 미칠 수 있는 수준은 아니었다.

Chl-a는 0.38-9.52  $\mu\text{g/L}$ 의 범위였고, 평균  $1.88 \pm 1.99$   $\mu\text{g/L}$ 의 범위로 봄, 가을에 다소 높은 경향을 보였지만, 조사 년도에 따른 차이가 있었다. 완도 북동부 해역의 특징상 이 해역의 유입되는 특별한 하천이 없고 주로 남쪽의 완도 남쪽 신지도 해협과 완도-해남 사이 해협을 통해 유입되는 조석류에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 비교적 해역의 환경이 안정적인 해역이다 (Jeong *et al.*, 2018). 이 해역의 영양염 공급은 간헐천을 통한 우수의 유입과 풍파 및 선박항행 등에 의한 저질의 재부유에 의해 이뤄지는 해역이다 (Jeong *et al.*, 2018). 또한 폭우에도 하천의 영향이 매우 제한적인 청정 해역으로 알려져 있어 전형적인 남해안의 기초생산력 패턴을 나타낸다 (Kang *et al.*, 2015). 한편 이러한 기초생산력을 에너지로 환산하기 위하여 Oh *et al.* (2002)는 해수 중 Chl-a 대비 에너지 전환계수를 사용하였으나, 굴은 거의 규조류에 대한 선택적 섭이성을 나타내므로 (Vaquer *et al.*, 2000; An *et al.*, 2017) 우리는 Platt (1971)의 전환계수를 사용하였다. 이를 통해 해역의 단위 수량당 에너지 함량을 평가한 결과 1.18-25.39 Kcal/m<sup>3</sup>/day (평균  $7.10 \pm 5.59$  Kcal/m<sup>3</sup>/day)의 범위였다.

통상적으로 굴양식의 종묘 입식은 봄철 수온상승기와 가을철 수온하강기에 이뤄지며 봄철에는 종패의 성장이 빠른 장점이 있지만 여름철 폐사의 위험이 있고, 가을철에는 폐사의 위험은 줄어들지만 초기 성장이 느린 특징이 있다. 따라서 종묘 크기가 작으면 봄철에 입식하고, 가을철에는 비교적 큰 종묘를 입식하는 것이 일반적이다. Troost *et al.* (2009)은 굴 폐각 정단부에서 발생하는 여과 속도는 개체 크기가 작을수록 속도가 높아진다고 보고하였다. 이는 작은 개체가 오히려 단위면적당 높은 여수효율을 나타내는 것으로 주변 환경수의 먹이 함량이 낮은 여름철에 자신의 체적대비 보다 많은 양의 해수를 여

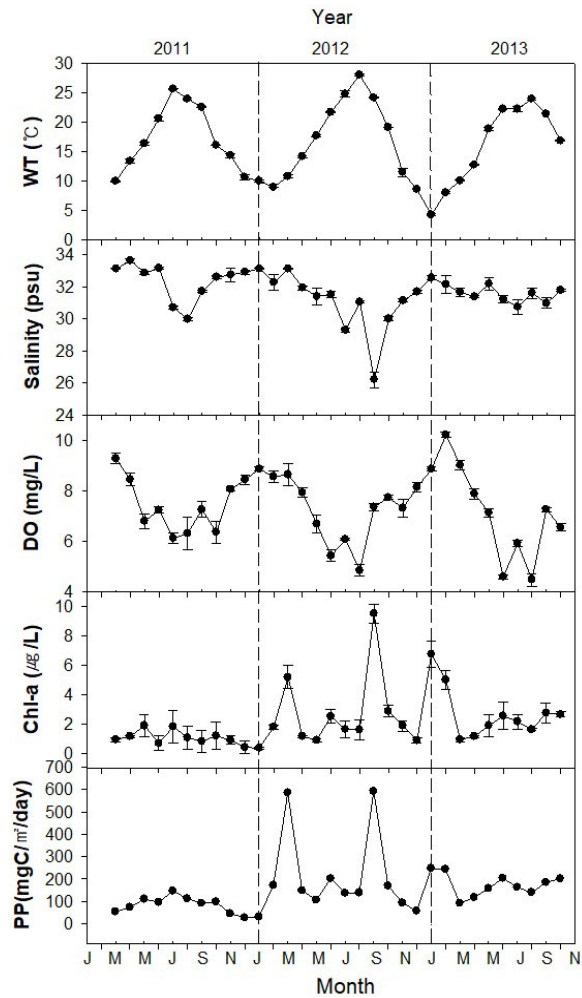


Fig. 2. Monthly variation in water quality parameters of the waters in the oyster farm on the northeastern coast of Wando Island (modified from Jeong and Cho, 2018).

과할 수 있어 여름철 생존 및 성장에 더 유리한 것으로 판단된다. 또한 여름철에는 큰 개체의 폐사율이 높기 때문에 (Jeong and Cho, 2020) 입식 시기를 적절하게 조절할 필요가 있다.

봄철 (Apr-11), 여름 (Jun-12), 가을철 (Nov-12)에 입식 이후 육중량의 변화는 Fig. 3과 같다. Apr-11은 입식 당시  $1.01 \pm 1.26$  g에서 당년 12월에 3.05 g까지 성장하였고, Jun-12는 입식 이후 4차례 태풍의 직접적 영향을 받아  $0.49 \pm 0.06$  g 종패가 2013년 3월에 2.45 g에 불과하였고, Nov-12는  $1.03 \pm 0.14$  g이던 종패는 2013년 5월에  $4.94 \pm 0.88$  g까지 성장하였다 (Fig. 3). 봄철에 입식한 종패는 느리지만 꾸준한 육중량의 성장이 나타났지만, 가을철에 입식한 종패는 빠른 성장 이후 여름철 대형 개체의 폐사로 인하여 평균 중량이 오히려 급하게 감소하는 경향을 나타내었다.

수하식 양식굴의 경우 성장에 27.8-39.0%가, 호흡에너지로

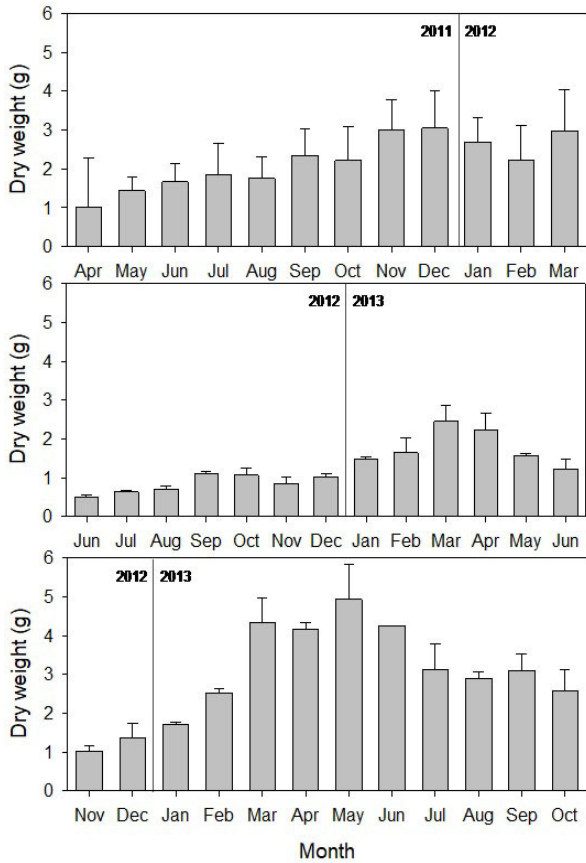


Fig. 3. Stocking time dependent growth of the oysters in the basis of dry weight on the northeastern coast of Wando Island at April 2011, June and November 2012, respectively.

는 42.4-51.6% 정도가 소비되는 것으로 보고되었지만 (Lee *et al.*, 2018), 우리 연구에서는 호흡에너지의 비중이 가장 높았고 (15.9-97.3%) 증육 (0-70%) 및 폐각 (0.9-31.8%)의 순이었다 (Fig. 4). 그러나 이러한 에너지 소비패턴은 계절적 영향을 받는 것으로 나타났고, 겨울에는 증육효율이 상승하고, 여름에는 폐각 형성에 소비되는 에너지의 비율이 증가하는 패턴을 나타내었다. 그러나 대량 폐사가 진행된 이후에는 성장정체 등의 영향으로 호흡에너지의 비율이 상대적으로 높아져 전체 소비에너지의 70% 이상을 나타내었다. 증육효율은 Nov-12가  $37.3 \pm 22.7\%$ 로 가장 높아, 입식 초기에 낮은 수온으로 폐각 성장보다는 육성장이 주도되면서 3월까지 50%이상의 증육에너지에 집중되는 현상을 볼 수 있었다. 폐각형성 에너지는 개체 성장속도와 비례하여 Apr-11 ( $24.6 \pm 6.7\%$ ) > Jun-12 ( $11.0 \pm 9.6\%$ ) > Nov-12 ( $7.7 \pm 8.6\%$ )의 순이었다. 폐각형성 에너지는 폐각의 유기물 함량에 기반하는 때문에 (Kim, 1980) bertalanffy 성장식에 기반한 우리의 결과는 실험 초기

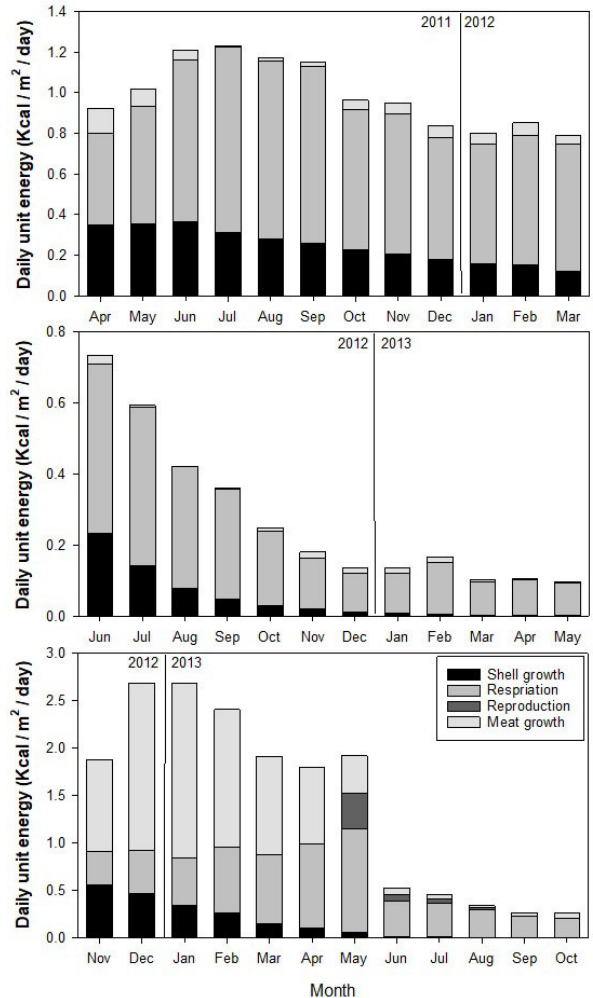
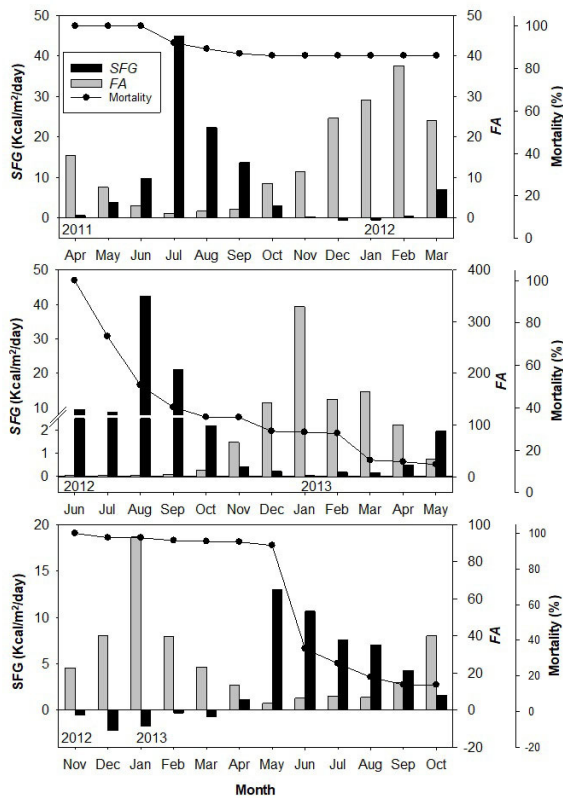


Fig. 4. Monthly variation of daily energy expenditure for metabolism and growth in cultured oyster on the northeastern coast of Wando Island.

에는 비교적 높은 비율을 차지하지만 실험말기에는 최대 성장치에 근접하면서 폐각형성 에너지로의 소비가 줄어드는 경향을 나타낸 것이다. 한편 평균 호흡에너지는 Jun-12 ( $83.6 \pm 9.0\%$ ) > Apr-11 ( $70.0 \pm 8.8\%$ ) > Nov-12 ( $50.8 \pm 25.7\%$ )의 순이었다. Jun-12는 높은 수온으로 인한 높은 대사율과, 태풍 스트레스에 의한 성장 억제 등의 복합적 영향으로 실험기간 중 대부분 호흡에너지의 소비가 많고 증육에너지는 극단적으로 억제되는 경향을 나타내었다.

이상의 대사에너지를 종합한 잠재성장력 (SFG)은  $-2.2-45.0$  Kcal/m<sup>2</sup>/day의 범위였고, 여름철에 높은 양의 SFG를 나타내었고, Jun-12를 제외하고는 겨울철에 음의 SFG를 나타내는 경향이 있었다 (Fig. 5). 연중 안정적 염분과 산소농도를 유지하는 조사 해역에서는 먹이 (Barillé *et al.*, 1997;



**Fig. 5.** Monthly variation in scope for growth (SFG), food availability (FA) and mortality of the cultured oyster on the northeastern coast of Wando Island.

Barillé *et al.*, 2011), 오염물질 (Jeong and Cho, 2007), 물리적 환경조건 (Hutchinson and Hawkins, 1992) 등의 영향을 고려할 수 있다. 그러나 우리 연구 해역은 오염물질 등의 유입이 보고된 바가 없으므로 (Jeong *et al.*, 2018), 이 해역은 주로 수온에 따른 여수를 상승에 의해 여름철에 비교적 높은 SFG를 나타낸 것으로 판단된다. 비록 SFG는 생물의 섭식 및 대사과정에 취득한 에너지와 대사소비 에너지의 잉여 에너지를 적용하므로 양의 SFG는 성장을 의미할 수 있지만 (Tamayo *et al.*, 2014), 주로 굴의 오염물질 (Jeong and Cho, 2007) 또는 환경변화에 (Barillé *et al.*, 2011) Le Moullac *et al.*, 2007) 대한 생리적 적응성을 검증하는 데 이용되었다.

환경수에서 공급되는 에너지원의 풍부도를 의미하는 먹이가용성 (FA) 은 1.1-329의 범위로 먹이가 부족한 시기는 없었다. 계절적으로 여름철에 비교적 낮은 먹이가용성을 나타내었고, 실험 말기에 폐사율이 증가함에 따라 먹이가용성이 높아지는 경향을 보였다 (Fig. 5). 먹이가용성에 영향을 주는 요인으로는 먹이, 해수유동 및 입식밀도 등이 보고되고 있으며

(Wilson-Ormond *et al.*, 1997; Okumura *et al.*, 2019), 우리 연구는 이러한 요인들을 포함하였다. 먹이는 기초생산력에 에너지 전환계수를 적용하여 산정하였고, 이를 섭취량에 대한 동화율을 적용하여 총 흡수에너지를 산정하였다. 우리의 동화효율은 55.5%를 적용하였고, 이는 Kusuki (1977) 의 50-60%의 범위내였다. 해수유동은 국립해양조사원의 스마트 조석예보 자료를 통해 일간 조석정보를 취합하여 (KHOA Smart Tide Forecast, <http://www.khoa.go.kr/swtc/main.do>) 일간 최대 유속을 적용하여 조석주기별 유동량을 산정하고, 이를 취합하여 월간 평균을 산정하였다.

굴의 여수작용은 아가미의 점막운동을 통한 흡입류에 이뤄지므로 통상 주변 환경수를 흡입할 수 있는 거리는 폐각말단에서 수 mm에서 (Monismith *et al.*, 1990) 수류환경에서는 최대 13.2 mm까지 확대되는 것으로 보고하였다 (Troost *et al.*, 2009). 따라서 양식장에서 양성밀도를 고려하여야만 하고, 우리의 연구에서는 이를 여수효율 ( $rFi$ )로 표현하였고 여수면적 대비 유동면적으로 환산하였다. 100 개체/망은 각고 10 cm 이상의 최대 크기를 제외하고는 여수면적이 유동면적을 초과하지 않으므로 여수효율 ( $rFi$ ) 은 모두 1로 적용되었다. 그러나 양성망 내부에 굴의 분포는 고르게 분포하지 않아 입식초기의 유동면적은 망면적 보다는 작을 것이며, 각 개체들의 섭식작용에 의한 흡입류의 감쇄효과 등을 고려하여 여수효율 ( $rFi$ ) 에 대한 재검토가 필요할 것으로 판단된다.

한편, 입식 밀도는 모두 100 개체/망으로 동일하지만 연구가 진행되어 봄철 포란기로 접어들면서 폐사가 나타나기 시작하고, 개체수가 감소함에 따라 단위면적당 먹이가용성은 증가하는 패턴을 나타냈다. 그러나 실제 개체별 먹이가용성은 조금은 다른 문제일 수 있을 것으로 판단된다. 즉 개체의 분포패턴은 수하식은 일정한 간격으로 부착하여 있지만 개체굴은 뒤엉켜 있어 망내 체적을 채우지 못하는 상황까지는 개체들의 분포가 매우 불규칙하고 유동적이므로 단위체적당 개체수로 일반화가 어렵다. 그러나 우리 연구결과 FA의 일반적 패턴은 겨울철에 저하되었다가 봄철에 점차 증가하는 패턴이었고, 이는 폐사와 높은 연관성이 있는 것으로 나타났다. 또한 FA가 음수 또는 0에 가까운 시기가 장기간 이어진 이후 폐사가 나타나는 등 해역의 생산성을 적절하게 제시하고 있다. 한편 Jun-12는 입식 초기에 FA가 2.0-3.2의 범위를 보이고 이후에도 지속적으로 높은 FA를 나타내었지만, 지속적인 폐사가 진행되었다. 이는 먹이보다는 높은 기온 중에 장거리 운송 등에 의한 이송 스트레스와 입식 초기 높은 수온 및 태풍 등의 복합적인 스트레스에 의한 폐사로 판단된다.

한편 산란기중에 폐사가 진행된 Apr-11과 Nov-12를 통해 갯벌에서 개체굴 양식시 생존율에 대한 산란기의 비용을 산정 가능할 것으로 판단된다. Nov-12의 경우, 초기에 높은 FA로

**Table 1.** Estimated parameters for energy intakes of the cultured oysters on the northeastern coast of Wando Island

Group	Month	Survival (Z, %)	<i>FR</i> (l/hr/oyster)	$V_E$ (kcal/m <sup>2</sup> /day)	$E_{abs}$ (Kcal/m <sup>2</sup> /day)	Remark
Apr-11	'11. 04	100.0	0.215	2.86	1.59	
	05	100.0	0.434	8.87	4.92	
	06	100.0	1.077	19.94	11.07	
	07	92.1	3.170	83.31	46.24	
	08	89.2	2.192	42.32	23.49	
	09	87.0	1.757	26.83	14.89	
	10	86.0	0.448	7.05	3.91	
	11	86.0	0.337	2.44	1.36	
	12	86.0	0.156	0.67	0.37	
	'12. 01	86.0	0.132	0.63	0.35	
	02	86.0	0.103	02.63	1.46	
	03	86.0	0.160	14.20	7.88	
	Jun-12	'12. 06	100.0	0.985	17.50	9.71
07		73.7	2.065	16.82	9.34	
08		50.7	3.282	79.58	44.16	
09		40.3	2.002	37.45	20.79	
10		35.7	0.727	4.45	2.47	
11		35.5	0.152	1.17	0.65	
12		17.5	0.085	0.41	0.39	
'13. 01		17.5	0.035	0.22	0.20	
02		28.0	0.078	0.63	0.35	
03		15.4	0.120	0.45	0.25	
04		12.6	0.212	0.89	0.57	
05	13.3	0.761	3.81	2.12		
Nov-12	'12. 11	100.0	0.985	2.29	1.29	
	12	96.6	0.133	0.86	0.49	
	'13. 01	97.5	0.087	1.67	0.94	
	02	96.0	0.039	3.85	2.11	
	03	95.1	0.090	2.17	1.24	
	04	94.5	0.143	5.18	2.93	
	05	93.3	0.257	25.83	14.59	
	06	27.0	0.935	19.05	11.50	
	07	25.3	1.933	16.87	8.93	
	08	19.3	1.962	14.89	8.41	
09	15.1	2.830	9.11	5.15		
10	13.4	1.679	3.42	2.17		

**Table 2.** Analysis of Pearson product moment correlation for FA and SFG against environmental factors, seawater temperature, salinity and emersion duration

Variables	Temp.	Sal.	Emer.	Remark
<i>SFG</i>	0.735 P < 0.0001	-0.419 P < 0.05	-0.602 P < 0.001	
<i>FA</i>	-0.623 P < 0.0001	0.191 P > 0.05	0.491 P < 0.01	



초기 폐사율은 미미한 수준이었지만, 2013년 5월 최저치를 (FA 3.7) 보인 이후 약 60%에 해당하는 대량의 폐사가 발생하였다. 한편 Apr-11의 경우, 입식 초기에는 15.4의 높은 FA를 나타냈지만, 이후 점차 감소하여 6월에는 1.1까지 감소하였다. 폐사 발생시기도 거의 이 시기와 일치하였으나, 약 30% 정도의 폐사가 대형개체 위주로 발생하였다. 이러한 1년생 굴과 2년생 굴의 폐사율의 차이는 먹이보다는 재생산에 대한 생리적 비용에 기인한 것으로 판단된다. 비록 Patrick *et al.* (2005)는 생식소 형성과 산란은 여름철 폐사와 무관한 것으로 보고하였지만, 많은 연구자들은 이러한 생리적 현상에 따른 에너지 비용이 여름철 대량폐사를 유발하는 것으로 보고하고 있다 (Mori *et al.*, 1965; Perdue *et al.*, 1981; Berthelin *et al.*, 2000). 따라서 완도해역의 갯벌에 개체굴을 입식할 경우 최소 5월에 상품크기까지 양성 가능한 입식종묘의 크기를 고려하여야 봄철 또는 가을철에 입식하여야 할 것이다.

## 결 론

우리의 연구결과 해역의 굴양식의 성패를 잘 나타내는 것은 먹이가용성 (FA)이었으나, 보다 높은 재연성을 위해서는 양성 환경의 현황을 보다 면밀하게 고려하여 여수효율 ( $rF$ )에 대한 검토가 필요하다. 먹이가용성에 기반하여 완도해역에서 갯벌 수평망식으로 굴 양식을 실시할 경우, 작은 종패는 봄철에, 큰 개체는 가을철에 입식하여 (각각 5 cm 기준) 이듬해 봄에 수확하는 것이 용이하다. 먹이가용성 (FA)이 낮은 시기가 지속되는 기간이 5-7월 산란기와 겹치면 여름철 폐사가 발생하고, 특히 태풍과 같은 물리적 스트레스가 겹치면 작황에 심각한 피해를 주는 폐사가 나타났다. 한편 여름철 폐사는 양성개체의 연령에 따라 달라 1년생은 15%, 2년생은 60%의 높은 폐사율을 나타내므로, 2년생 폐를 양성하기 위해서는 불임의 삼배체를 고려하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

## 사 사

이 논문은 군산대학교 수산과학연구소 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

## REFERENCE

- An, Y.-J., Jo, S.-G., Jeong, W.-G., and Cho, S.-M. (2017) Food selectivity of the Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, reared at rack culture in tidal flat of the eastern coast of Wando island, Korea. *Korean Journal of Malacology*, **33**: 299-307.
- Baker, S., and Mann, R. (1992) Effects of hypoxia and anoxia on larval settlement, juvenile growth, and juvenile survival of the oyster *Crassostrea virginica*. *The Biological Bulletin*, **182**: 265-269.
- Baldwin, B.S., and Newell, R.I. (1991) Omnivorous feeding by planktotrophic larvae of the eastern oyster *Crassostrea virginica*. *Marine Ecology Progress Series*, **78**: 285-301.
- Baldwin, B.S., and Newell, R.I. (1995) Relative importance of different size food particles in the natural diet of oyster larvae. *Marine Ecology Progress Series*, **120**: 135-145.
- Barillé, L., Lerouxel, A., Dutertre, M., Haure, J., Barillé, A.-L., Pouvreau, S., and Alunno-Bruscia, M. (2011) Growth of the Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) in a high-turbidity environment: Comparison of model simulations based on scope for growth and dynamic energy budgets. *Journal of Sea Research*, **66**: 392-402.
- Barillé, L., Prou, J., Héral, M., and Razet, D. (1997) Effects of high natural seston concentrations on the feeding, selection, and absorption of the oyster *Crassostrea gigas* (Thunberg). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, **212**: 149-172.
- Barillé, L., Lerouxel, A., Dutertre, M., Haure, J., Barillé, A.-L., Pouvreau, S., and Alunno-Bruscia, M. (2011) Growth of the Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) in a high-turbidity environment: comparison of model simulations based on scope for growth and dynamic energy budgets. *Journal of Sea Research*, **66**: 392-402.
- Berthelin, C., Kellner, K., Mathieu, M. (2000). Storage metabolism in the Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) in relation to summer mortalities and reproductive cycle (West Coast of France). *Comparative biochemistry and physiology Part B: Biochemistry and molecular biology*, **125**(3): 359-369.
- Brown, J.R., and Hartwick, E.B. (1988) Influences of temperature, salinity and available food upon suspended culture of the Pacific oyster, *Crassostrea gigas*: I. Absolute and allometric growth. *Aquaculture*, **70**: 231-251.
- Cho, S.-M. (2021) Density effect on growth and cultural production of the Pacific Oyster, *Crassostrea gigas*, in tidal flat rack oyster farm. *Korean Journal of Malacology*, **36**: 143-148.
- Choi, W.J., Na, G.H., Chun, Y.Y., and Park, C.K. (1991) Self-purification capacity of eutrophic Buk Bay by DO mass Balance. *Bulletin of Korean Fisheries Society*, **24**: 21-30.
- Delaporte, M., Soudant, P., Lambert, C., Moal, J., Pouvreau, S., and Samain, J.-F. (2006) Impact of food availability on energy storage and defense related hemocyte parameters of the Pacific oyster *Crassostrea gigas* during an experimental reproductive cycle. *Aquaculture*, **254**: 571-582.
- Gagnaire, B., Frouin, H., Moreau, K., Thomas-Guyon, H., and Renault, T. (2006) Effects of temperature and salinity on haemocyte activities of the Pacific oyster, *Crassostrea gigas* (Thunberg). *Fish & shellfish immunology*, **20**: 536-547.

- Gilad, O. (2008) Competition and Competition Models. In: Jørgensen SE, Fath BD (eds) Encyclopedia of Ecology. Academic Press, Oxford, pp. 707-712.
- Hutchinson, S., and Hawkins, L.E. (1992) Quantification of the physiological responses of the European flat oyster *Ostrea edulis* L. to temperature and salinity. *Journal of Molluscan Studies*, **58**: 215-226.
- Jeong, W.-G., and Cho, S.-M. (2007) Long-term effect of polycyclic aromatic hydrocarbon on physiological metabolisms of the Pacific oyster, *Crassostrea gigas*. *Aquaculture*, **265**: 343-350.
- Jeong, W.-G., and Cho, S.-M. (2018) Estimation of primary production of the waters around rack oyster farm at Wando, Korea. *Fisheries and aquatic sciences*, **21**: 9(1-7).
- Jeong, W.-G., and Cho, S.-M. (2020) Growth comparison of the Pacific Oyster, *Crassostrea gigas*, between different stocking times into tidal flat rack culture system. *Korean Journal of Malacology*, **36**: 111-116.
- Jeong, W.-G., Cho, S.-M., and Lee, S.-J. (2009) Studies for the sustainable management of oyster farms in Pukman Bay, Korea: Estimation of carrying capacity from food availability. *Fisheries and aquatic sciences*, **12**: 118-129.
- Jeong, W.G. (1998) Studies on proper management of oyster farms in Pukman Bay, Korea. Ph.D. Thesis, Jeju University, Fisheries Sciences, Jeju, 193pp.
- Kang, J.H., Cho, S.-M., Kim, T.O., and Park, K.S. (2015) Sanitary assessment of the oyster rack culture waters in Wando, Korea. *The Korean Journal of Malacology*, **31**: 129-136.
- Kim, M.-C., Cho, S.-M., and Jeong, W.-G. (2007) Short-term physiological response of the Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, on exposure to varying levels of polycyclic aromatic hydrocarbon. *Aquaculture Research*, **38**: 1612-1618.
- KIM, Y.-S. (1980) Efficiency of energy transfer by a population of the farmed Pacific oyster, *Crassostrea gigas* in Geoje - Hansan Bay. *Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **13**: 179-193.
- Kim, Y.-S. (1995) Filtering rate model of farming oyster, *Crassostrea gigas* with effect of water temperature and size. *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **28**: 589-598.
- Kusuki, Y. (1977). On measurement of the filtration rates of the Japanese oyster. *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries*, **43**(9): 1069-1076.
- Lee, Y.-J., Han, E., Wilberg, M.J., Lee, W.C., Choi, K.-S., and Kang, C.-K. (2018) Physiological processes and gross energy budget of the submerged longline-cultured Pacific oyster *Crassostrea gigas* in a temperate bay of Korea. *PloS one*, **13**: e0199752-e0199752.
- Le Moullac, G., Quéau, I., Le Souchu, P., Pouvreau, S., Moal, J., René Le Coz, J., and François Samain, J. (2007) Metabolic adjustments in the oyster *Crassostrea gigas* according to oxygen level and temperature. *Marine Biology Research*, **3**: 357-366.
- McKindsey, C.W., Thetmeyer, H., Landry, T., and Silvert, W. (2006) Review of recent carrying capacity models for bivalve culture and recommendations for research and management. *Aquaculture*, **261**: 451-462.
- Monismith, S.G., Koseff, J.R., Thompson, J.K., O'Riordan, C.A., and Nepf, H.M. (1990) A study of model bivalve siphonal currents. *Limnology and Oceanography*, **35**: 680-696.
- Mori, K., Tamate, H., Imai, T., Itikawa, O. (1965) Studies on the mass mortality of the oyster in Matsushima Bay. V. Changes in the metabolism of lipids and glycogen of the oyster during the stages of sexual maturation and spawning. *Bulletin of Tohoku Regional Fisheries Research Laboratory*, **25**: 66-68.
- Nell, J.A., and Holliday, J.E. (1988) Effects of salinity on the growth and survival of Sydney rock oyster (*Saccostrea commercialis*) and Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) larvae and spat. *Aquaculture*, **68**: 39-44.
- Oh, K.H., Pang, I.C., HOFMANN, E.E., Kim, Y., Kim, S.Y., Park, Y.J., and Choi, K.S. (2002) Modeling oyster populations dynamics-I. Effect of available food on growth of the Pacific oyster *Crassostrea gigas* in Goseong Bay, Korea. *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **35**: 327-335.
- Okumura, Y., Nawata, A., Ito, H., Oshino, A., and Hara, M. (2019) Suitable oyster culture density in Oginohama Bay, Miyagi, Japan. In: Komatsu T, Ceccaldi H-J, Yoshida J, Prouzet P, Henocque Y (eds) Oceanography Challenges to Future Earth - Human and Natural Impacts on our Seas. Springer International Publishing, Cham, pp. 351-363.
- Perdue, J., Beattie, J.H., Chew, K.K. (1981) Some relationships between gametogenic cycle and summer mortality phenomenon in the Pacific oyster *Crassostrea gigas* in the Washington state. *Journal of Shellfish Research*, **1**: 9-16.
- Platt, T. (1971) The annual production by phytoplankton in St. Margaret's Bay, Nova Scotia. *ICES Journal of Marine Science*, **33**: 324-333.
- Raillard, O., and Ménesguen, A. (1994) An ecosystem box model for estimating the carrying capacity of a macrotidal shellfish system. *Marine Ecology Progress Series*, **115**: 117-130.
- Saxby, S.A. (2002) A review of food availability, sea water characteristics and bivalve growth performance at coastal culture sites in temperate and warm temperate regions of the world. Fisheries Research Division, WA Marine Research Laboratories, Perth WA 6000, pp. 44.
- Soletchnik, P., Lambert, C., Costil, K. (2005) Summer mortality of *Crassostrea gigas* (Thunberg) in relation to environmental rearing conditions. *Journal of Shellfish Research*, **24**(1): 197-207.
- Tamayo, D., Ibarrola, I., Urrutxurtu, I., and Navarro, E. (2014) Physiological basis of extreme growth rate



- differences in the spat of oyster (*Crassostrea gigas*). *Marine Biology*, **161**: 1627-1637.
- Troost, K., Stamhuis, E.J., van Duren, L.A., and Wolff, W.J. (2009) Feeding current characteristics of three morphologically different bivalve suspension feeders, *Crassostrea gigas*, *Mytilus edulis* and *Cerastoderma edule*, in relation to food competition. *Marine Biology*, **156**: 355-372.
- Utting, S., and Millican, P. (1997) Techniques for the hatchery conditioning of bivalve broodstocks and the subsequent effect on egg quality and larval viability. *Aquaculture*, **155**: 45-54.
- Vaquer, C.D.A., Lam-H?ai, T., Rougier, C., Mazouni, N., Lautier, J., Collos, Y., and Le Gall, S. (2000) Feeding rate of the oyster *Crassostrea gigas* in a natural planktonic community of the Mediterranean Thau Lagoon. *Marine Ecology Progress Series*, **205**: 171-184.
- Wilson-Ormond, E., Powell, E., and Ray, S. (1997) Short-term and small-scale variation in food availability to natural oyster populations: food, flow and flux. *Marine Ecology*, **18**: 1-34.

