

진주조개 *Pinctada fucata martensii* 의 실내월동을 위한 저온노출에 따른 생리적 변화

이정미·이상원·조상만^{1*}경상남도수산자원연구소, ¹군산대학교 해양생명양식학과

Physiological Response of the Pearl Oyster, *Pinctada fucata martensii*, to Low Water Temperature: a Preliminary Study for Indoor Overwintering

Jeong-Mee Lee, Sang-Won Lee and Sang-Man Cho^{1*}Fisheries Resources Research Institute, Tongyeong
650-947, Korea¹Dept. Aquaculture and Aquatic Resources, Kunsan National University,
Kunsan 573-701, Korea

With the aim of developing an indoor overwintering technique for Pearl oyster, *Pinctada fucata martensii*, the metabolic rates of young oysters (52.4–83.0 mm in shell length) were measured for 2 weeks at water temperatures of 8, 10, 12, and 14°C. The filtration rate (*FR*) ranged 0 to 4.84 L h⁻¹gDW⁻¹ (mean, 0.02±0.06 to 3.12±1.45), with significant changes observed over time except for the case of a water temperature of 14°C. Respiration rate (*R*) ranged from 0 to 2.370 mgO₂ h⁻¹gDW⁻¹ (mean, 0 to 1.77±0.37), with significant respiratory disorders observed at temperatures below 12°C; in contrast, the rate increased on the 14th day of the experiment in the case of a temperature of 14°C. No significant difference was observed among the different water temperatures in terms of excretion rate (*E*) or absorption efficiency (*Abs. eff.*), except for a significant decrease in aerobic metabolism in the case of water temperature of 8°C. The estimated scope for growth (*SFG*) ranged from -9.1 to 126.9 J h⁻¹gDW⁻¹ (mean, -4.1±2.6 to 82.85±42.6). A significant energy loss was found at 8°C, with negative *SFG* observed throughout the experiment and a gradual energy decrease observed over time at water temperatures of 10°C and 12°C. However, *SFG* remained positive throughout the experiment in the case of 14°C. The estimated minimum energy requirement, as assessed from energy expenditure, is 8.00–34.24 J h⁻¹gDW⁻¹ (mean, 17.67±6.17). In conclusion, the lowest temperature suitable for indoor overwintering is above 14°C.

Key words: Pearl oyster, *Pinctada fucata martensii*, Indoor overwintering, Metabolism, Scope for growth

서 론

우리나라의 진주조개 양식은 1961년 경남 통영시 육지도에 서 국립수산진흥원에서 시험 양식을 실시한 이후 한산거제만을 중심으로 양식되어 왔다. 1970년대까지는 약 30여 개소의 양식장이 성업하였지만, 양식기술이 미흡하여 큰 소득은 이루지 못했지만, 1980년대 이후 삼핵관련 기술이 축적되어 산업기반이 정비되고 양식진주를 수출하기 시작하였다. 그러나 최근 양식산업기반이 현저하게 약화되어 2008년에는 25건 86 ha의 면허건이 있고, 이중 대부분은 소수 업체에서 소유하고 있는 실정이다 (Tongyeong city, 2005). 이러한 산업기반의 약화 원인으로는 진주가공기술 부재와 월동·피한 등의 부수적 경비 소요로 인한 저부가가치형 산업으로의 전락 등을 그 원인으로 들 수 있다.

세계 해수 진주시장의 80%이상을 점유하고 있는 일본은 1966년 이후 지속적으로 생산량이 감소하고 있는 추세이고

최근 오랜 양식으로 인한 종의 열성화 현상과 환경변화 등으로 인하여 그 생산기반이 점차 열성화되고 있는 실정이지만, 1980년대 이후 중국의 생산량이 급증하여 세계 생산량은 오히려 과잉생산에 우려하고 있는 실정이다 (Jeong et al., 2005). 따라서 우리나라 진주양식산업을 고부가가치 산업으로 전환하기 위해서는 가공기술 확보와 양식비용 절감 등의 개선을 위한 자구노력이 꼭 필요한 실정이다. 이에 2005년부터 실시된 “통영진주명품” 사업은 진주 산업육성을 위해 소기의 성과를 이루었다고 볼 수 있지만, 아직까지 현실적인 문제에 노출되어 있고, 무엇보다 생산원가 절감과 생산기반 확충을 위한 월동법의 개선은 아주 시급한 문제라고 할 수 있다.

진주조개의 월동에 관한 연구는 1969년 국립수산진흥원 (Kim, 1969) 에서 최초 시도된 이래 다양한 시도가 있어왔다 (Park, 2002). 매년 겨울철이면 제주도로 이동하는 월동의 문제를 해결하기 위해 발전소 온배수 및 실내 월동을 위한 여러 가지 시도가 있어 왔고, 보다 저수온에 강한 종을 찾고자 우리나라 토착형 진주모패를 탐색하는 등 다양한 시도가 있었지만,

*Corresponding author: gigas@kunsan.ac.kr

아직은 큰 성과를 이루지 못하였다. 그러나 최근 발전된 사육 기술과 먹이생물 배양기술로 인하여 충분히 실내월동이 가능할 것으로 판단되고 실내월동의 에너지 비용 대비 제주 월동 경비를 고려하면 충분히 경쟁력이 있을 것으로 판단된다.

일반적으로 진주조개의(*Pinctada fucata martensii*) 서식 적수온은 15-30°C로 알려져 있고 최적 수온범위는 20-25°C이며 8°C 이하에서는 아가미 섬모운동이 정지하는 것으로 알려져 있지만 (Yoo, 2000), 성패의 성장적수온은 12-26°C로 알려져 있다 (Yoo et al., 1986). 그러나 겨울철 실내월동은 경영상의 문제를 고려할 때 월동시 수온을 적정 수온대로 높여서 양성하기에는 다소간의 무리가 따르는 것이 현실이다. 따라서 최소경비로 성공적인 실내월동 시스템을 개발하기 위해서는 저수온에 대한 진주조개 유패의 적응 전략에 대해 연구할 필요가 있다. 즉, 저수온에 노출된 진주조개 유패의 대사율 변화에 기초한 에너지 요구량의 변화를 살펴봄으로써 가장 경제적인 사육조건, 아마도 최저 수온조건을 구명할 필요가 있을 것으로 판단된다.

이 연구는 가장 경제적인 실내월동 조건을 알아보고자 진주조개를 최저 성장수온 이하의 수온에 노출시켜 대사율 변화를 관찰하고, 이를 통해 성장에 피해영향을 최소화 할 수 있는 최저 수온조건을 찾고자 하였다. 이는 겨울철 난방비등 경비 절감을 위해 꼭 필요한 조건으로, 15°C 이상은 서식 적수온으로 알려져 있어 이 연구에서 수온범위는 8-14°C의 범위에서 실시하였다.

재료 및 방법

진주조개

실험에 사용한 진주조개는 경남 거제 연안에서 채집한 자연산 모패로부터 경상남도 수산자원연구소에서 채란하여 육성한 F1 개체로써 인공채묘 후 인근 양식장에서 관리 육성한 개체를 사용하였다. 진주조개의 크기는 각장 52.4-83.0 mm의 범위였고 (평균 63.9±7.0 mm), 육중량은 0.78-2.55 gDW의 범위였다 (평균 1.60±0.50 gDW). 실험에 들어가기 전에 진주조개는 유수식 실내 사육수조에서 3일간 순치하였고, 이 때 먹이는 실험의 용이성을 높이기 위해 *Isochrysis galbana* 단일 종을 급이하였다.

실험조건

진주조개는 무작위로 4개 그룹으로 분류하여 유수식 챔버에 개체별로 수용하여 30 L/hr.의 유속으로 유수시키며 실험하였다. 수온은 8, 10, 12, 14°C의 4개 구간으로 설정하였고, 각 수온구별로 5개의 반복구와 진주조개를 넣지 않은 대조구 1개를 설치하였다. 실험은 총 14일 동안 실시되었고, 실험기간 중 염분은 33.17-33.83 psu였고, pH는 7.75-8.23의 범위였다. 실험 개시후 1, 2, 6 및 14일째 각각의 대사율의 변화를 측정하였다.

대사율 측정

각각의 대사율은 아래와 같은 수식에 의해 계산하였다. 여

수율 (Filtration rate, FR)은 급이한 먹이의 감소율에 의해 산정하였고, (식 1)과 같다. 이때 Chl_{con} 및 Chl_{ex} 는 대조구와 실험구의 Chlorophyll-a 양을 나타내고, v 는 유속 (L/h), h 는 단위시간 (=1시간), W_D 는 진주조개의 건중량에 해당한다. 한편, 호흡률 (Respiration rate, R) 및 암모니아 배설률 (Ammonia excretion rate, E)은 (식2-3)과 같은 방법으로 산정하였다. 대사율 산정을 위해 여수율 산정을 위한 유입수와 유출수의 클로로필-a 농도변화는 Strickland and Parson (1972)의 방법에 따라 측정하였다. 호흡을 변화는 YSI 556 multiprobe system (YSI Inc., USA)를 이용하여 유입수와 유출수간의 용존산소의 농도변화로 측정하였고, 암모니아농도는 Solorzano (1969)에 따라 phenol hypochlorite법으로 유입수와 유출수간의 암모니아 농도변화를 통해 산정하였다.

$$FR (L h^{-1}) = \frac{(Chl_{con} - Chl_{ex})}{Chl_{con}} \times v \times h / W_D \quad (\text{식 } 1)$$

$$R (mgO_2 h^{-1}gDW^{-1}) = (DO_{con} - DO_{ex}) \times v \times h / W_D \quad (\text{식 } 2)$$

$$E (mgNH_4 h^{-1}gDW^{-1}) = (Am_{ex} - Am_{con}) \times v \times h / W_D \quad (\text{식 } 3)$$

섭이한 먹이의 흡수율 (Absorption efficiency, *Abs. eff.*)은 Conover (1966)의 방법에 따라 먹이와 변의 유기물 함량의 비로 구하였고 (식 4), 유기물함량은 유리섬유 여과지에 여과한 먹이 및 변을 완전히 건조시키고 이를 450°C에서 2시간동안 연소시켜 감소된 중량을 측정하였다.

$$Abs. eff. = (f - e) / f(1 - e) \quad (\text{식 } 4)$$

이때 f 는 먹이중의 유기물 함량비 (= 회제거건중량/건중량)이고 e 는 변의 유기물 함량비에 해당한다. 이상의 측정치로부터 에너지수지 (Scope for growth, SFG)를 (식 5)와 같이 계산하였고, 이때 흡수한 에너지 함량 (Absorbed energy, *AE*)은 (식 6)과 같이 계산하였다.

$$SFG (J h^{-1}gDW^{-1}) = AE - RE \times EE \quad (\text{식 } 5)$$

$$AE (J h^{-1}gDW^{-1}) = FR \times AC \times Ec \times Abs. eff. \quad (\text{식 } 6)$$

여기서 *AE*, *RE* 및 *EE*는 흡수에너지, 호흡과 암모니아 배설에 의해 소실된 에너지를 나타내고, 이는 각각의 대사율에 에너지 전환계수를 적용하여 계산하였다. 즉 *I. galbana*의 에너지함량은 0.608 $\mu J cell^{-1}$ 를 (Sprung, 1984), 단위 산소당 에너지 전환계수는 Gnaiger (1983)에 따라 0.45 $J \mu mol O_2^{-1}$ 을 이용하였고, 단위 암모니아당 에너지 전환계수는 Widdows (1978)에 따라 24.83 $kJ gNH_4-N^{-1}$ 를 적용하였다. 한편 이때 패류의 스트레스 지표로 활용되고 있는 O:N 원자비는 (Bayne, 1985; Widdows, 1985) 호흡률과 암모니아 배설률로부터 산정하였다.

통계분석

각각의 측정치는 제곱근으로 변환하여 표준화하였고, 이후 One-way ANOVA test를 실시하여 유의성 검정을 실시하였고, 그룹간 유의차가 인정되면 Holm-Sidak test를 실시하여 평균 간 유의성을 검정하였다. 모든 통계처리는 Sigma stat 3.0 (Systat Software, Inc., U.S.A.) 을 사용하였다.

결 과

실험기간중 여수율(FR)은 0-4.84 (평균 0.02 ± 0.06 - 3.12 ± 1.45) $L h^{-1} gDW^{-1}$ 의 범위였고, 각 수온별로는 2일째를 제외하고 14°C의 여수율(FR)이 항상 다른 수온구보다 높았다. 또한 수온 8, 10, 12°C와는 달리 14°C는 실험기간 중 여수율의 유의한 수준의 변화가 없었다 ($P < 0.05$). 한편, 수온 8°C에서는 6일째부터 먹이 섭취가 거의 정지하였고, 10°C에서도 일부 수조에서 여수율이 0에 근접한 경우도 나타났다 (Fig. 1).

호흡율(R)은 0-2.370 (평균 $0-1.77 \pm 0.37$) $mgO_2 h^{-1} gDW^{-1}$ 의 범위였고, 전 조사일에서 호흡율(R)은 항상 수온과 비례하여 14°C에서 가장 높았다. 각 수온구별로는 10°C와 12°C에서는 실험기간 동안 큰 변화가 없었지만, 수온 8°C에서는 실험 6일째부터 거의 호흡이 정지하였고, 14일에도 간헐적인 호흡이 관찰되었지만 거의 대부분 호흡이 정지 상태였다. 또한 이 기간 동안 외부 자극에 대한 반응이 매우 둔감하여 외부충격에 폐각의 개폐반응이 아주 둔감해지는 것을 관찰할 수 있었다. 한편 14°C에서는 실험 14일째 오히려 호흡률이 유의하게 증가하였다 (Fig. 2, $P < 0.05$).

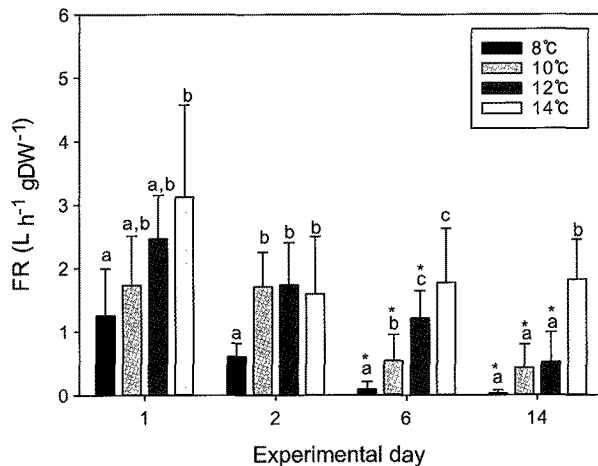


Fig. 1. Changes of FR ($L h^{-1} gDW^{-1}$) at 4 different water temperatures. Different letters and * indicate significant differences ($P < 0.05$) between temperature groups at same day of sampling and between experimental days at same temperature group, respectively. The error bar indicates the standard deviation of measurements.

암모니아배설율(E)은 0.003-0.080 (평균 0.009 ± 0.010 - 0.054 ± 0.020) $mgNH_4 h^{-1} gDW^{-1}$ 의 범위였고, 실험 2일까지는 수온에 따른 유의적인 차이가 나타났지만, 실험 6일째부터

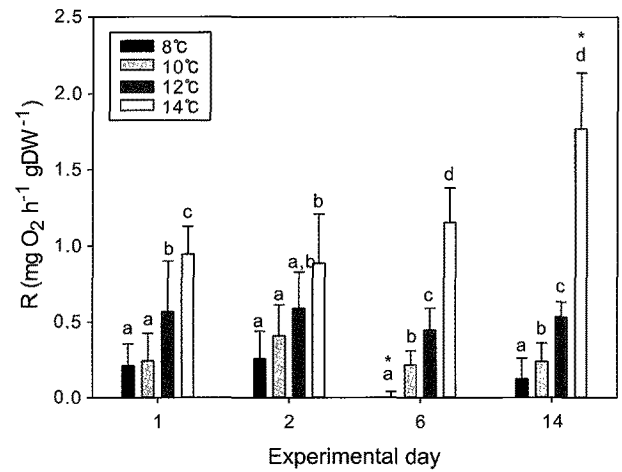


Fig. 2. Changes in R ($mg O_2 h^{-1} gDW^{-1}$) at 4 different water temperatures. Different letters and * indicate significant differences ($P < 0.05$) between temperature groups at same day of sampling and between experimental days at same temperature group, respectively. The error bar indicates the standard deviation of measurements.

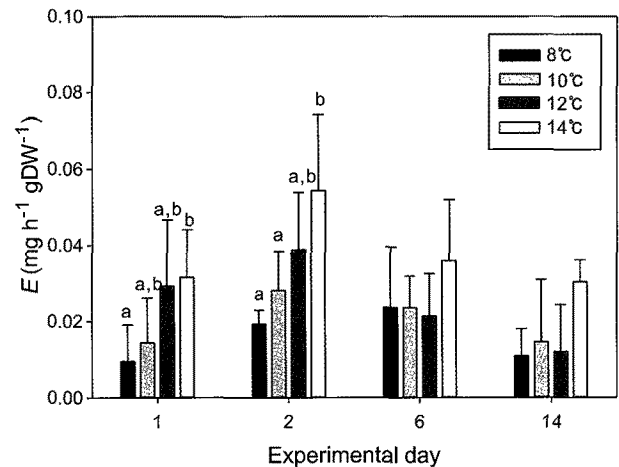


Fig. 3. Changes in E ($mgO_2 h^{-1} gDW^{-1}$) at 4 different water temperatures. Different letters and * indicate significant differences ($P < 0.05$) between temperature groups at same day of sampling and between experimental days at same temperature group, respectively. The error bar indicates the standard deviation of measurements.

는 유의적 차이를 관찰할 수 없었다 ($P < 0.05$). 한편 각 수온구별로는 실험이 진행되는 동안 유의적인 배설율의 차이는 관찰할 수 없었다 (Fig. 3, $P < 0.05$).

흡수율(Abs. eff.)는 수온 8°C에서는 전 조사기간 중 변을 배설하지 않아 측정할 수 없었고, 수온 10-14°C에서는 0.157-0.734 (평균 0.508 ± 0.026 - 0.595 ± 0.114)의 범위였다. 개체별 흡수율(Abs. eff.)의 차이는 컸지만, 각 수온구별 및 조사일별 평균 흡수율은 유의한 수준의 차이를 관찰할 수 없었다 (Fig. 4, $P < 0.05$).

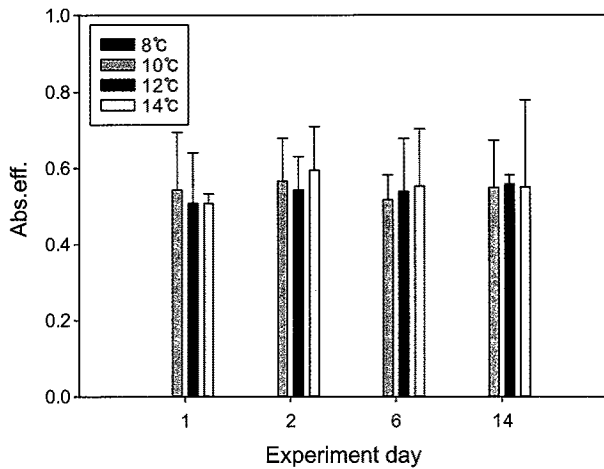


Fig. 4. Changes in *Abs. eff.* at 4 different water temperatures. Since no feces production was observed, we could not measure the *Abs. eff.* at 8°C. No significant changes were observed over experimental days. The error bar indicates the standard deviation of measurements.

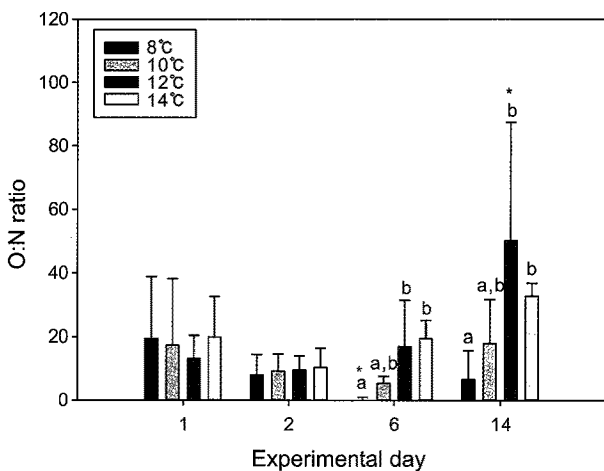


Fig. 5. Changes in O:N ratio at 4 different water temperatures. Different letters and * indicate significant differences ($P<0.05$) between temperature groups at same day of sampling and between experimental days at same temperature group, respectively. The error bar indicates the standard deviation of measurements.

O:N 원자비는 0-98.1 (평균 5.37 ± 2.13 - 50.27 ± 37.13)의 범위였고, 실험 2일째는 수온구별로 차이가 없었지만, 실험 6일째 이후부터는 저수온구에서 유의하게 감소하는 경향이 있었다 ($P<0.05$). 특히 수온 8°C에서 6일차 이후 대사활동이 저하됨에 따라 O:N 원자비가 거의 0에 가깝게 산정되었다 (Fig. 5).

각 개체별 에너지수지 (SFG)는 -9.1 - 126.9 (평균 -4.1 ± 2.6 - 82.85 ± 42.6) $J h^{-1} gDW^{-1}$ 의 범위였다. 지속적인 에너지 손실을 나타낸 수온 8°C를 제외하고, 모든 수온구에서 양의 에너지수지 (SFG)를 나타내었다. 양의 에너지수지 (SFG)를 나타낸 수

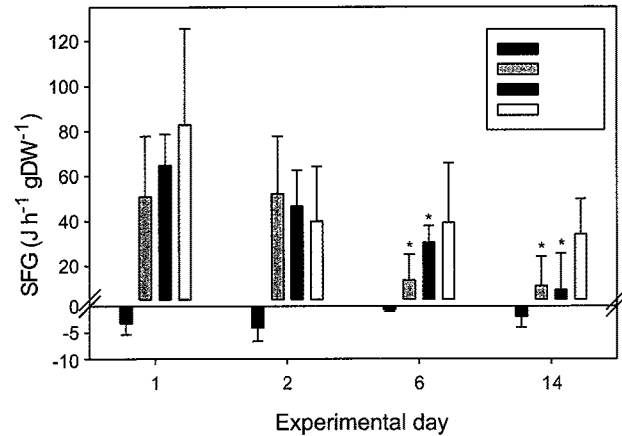


Fig. 6. Changes in SFG ($J h^{-1} gDW^{-1}$) at 4 different water temperatures. At 8°C, negative SFG was observed during experiment, which indicate that continuous energy loss at this temperature. The "*" indicates significant differences ($P<0.05$) between experimental days at same temperature group. The error bar indicates the standard deviation of measurements.

온구는 실험초기에는 서로 유의한 수준의 차이는 없었지만 ($P<0.05$), 실험 6일째 이후 수온 10°C와 12°C에서는 유의하게 감소하여 에너지 축적이 현저하게 저하되는 것을 볼 수 있었다 ($P<0.05$). 그러나 14°C는 실험기간중 유의한 수준의 에너지수지 (SFG) 감소는 관찰되지 않았고, 이는 실험 종료시까지도 지속되었다 (Fig. 6, $P<0.05$).

고 찰

이매패류의 패각 개폐운동은 대사작용과도 밀접한 관계가 있고 (Langton, 1977; Fujii and Toda, 1991), 접촉, 그늘짐, 포식자의 접근이나 독성물질의 자극 등과 같은 외부자극과 (Baldwin and Kramer, 1994; Nagai et al., 2006) 유속 등의 물리적 요인에도 민감하게 반응하는 것으로 알려져 있다 (Filgueira et al., 2006). 이러한 문제 해결을 위해 1970년대부터 flow-through chamber를 사용하여왔다 (Haven and Morales-Alamo 1970, Bayne et al., 1973). Flow-through chamber는 재현성과 정확성이 높아 널리 활용되고 있는 방법중 하나이다 (Cranford, 2001; Riisgard, 2001; Widdows, 2001). 그러나 flow-through chamber를 사용할 경우 이매패류의 여수율은 초기에는 유속에 따라 비례하여 증가하다가 어느 수준에 도달하면 안정상태를 보이다가 이후 급격하게 격감하는 추세를 보인다 (Filgueira et al., 2006). 우리 연구에서 사용한 유속은 Filgueira et al. (2006)의 실험조건 범위내로 진주조개의 여수율을 감안하면 충분히 적정 유속으로 판단된다. 그러나 실내월동은 가온 등의 문제로 공급할 수량의 제한을 받으므로 이를 감안할 필요가 있다.

한편 챔버내 진주조개의 밀도도 여수율에 영향을 줄 수 있다. Yu and Culver (1999)는 개체수준의 여수율은 집단 여수율보다 항상 높은 것으로 보고하였고, 이는 먹이경쟁과 개체

간 환경수의 재여과 (re-filtration)에 의한 것이라 보고하였다. 우리 연구는 챔버당 2개체씩 실험하였고, 이러한 실험조건은 flow-through chamber를 사용할 경우에는 통용되는 조건이다 (Yu and Culver, 1999). 또한 실제 월동사육은 개체수준이 아닌 채통에 의한 집단 수하를 하고 있으므로 개체수준에서 측정된 여수율을 조금은 과장된 데이터를 생산할 우려가 높다고 볼 수 있다 (Yu and Culver, 1999).

이때패류의 여수율과 호흡율은 수온에 아주 민감하게 반응하고 (Winter, 1978; Jiang et al., 2008), 통상 호흡율은 먹이섭이 활동이 증가함에 따라 증가하는 경향이 있다 (Bayne and Newell, 1983). 한편 낮은 수온은 이때패류의 동면을 야기하는 것으로 알려지고 있고 (Galtsoff, 1928; Loosanoff, 1939), 진주조개는 8°C가 동면수온으로 알려져 있다 (Yoo, 2001). 진주조개의 여수율은 수온 12-20°C 이상에서 완만하게 증가하다가, 20°C 이상에서는 급격하게 증가하는 것으로 보고되고 있고, 우리의 여수율 조사결과는 이전의 보고된 진주조개 여수율과 비슷한 범위에 속하였다 (Numaguchi, 1994). 수온 8-10°C에서는 사육일수가 경과함에 따라 여수율이 현저하게 감소하였고 수온 8°C에서는 실험 6일 이후 섭이활동이 거의 정지되었다. 호흡율은 실험기간동안 수온에 의한 차이가 유의하게 나타나 항상 14°C의 실험구에서 가장 높게 나타났다. 그러나 수온 8°C에서는 실험 6일째 이후 chamber 별로 편차가 있었지만 거의 호흡이 정지된 것으로 나타나 (Fig. 2) 동면상태에 들어간 것으로 판단된다 (Yoo, 2000). 8°C 실험구의 진주조개는 대부분 폐각을 굳게 닫고 있었지만 일부 개체는 완전히 폐각이 열고 외부 반응에 매우 둔감하게 반응함으로써 저수온에 의한 심각한 대사 장애를 받고 있는 것으로 판단되었다.

이때패류는 단백질의 이화작용에 의해 생성된 아미노산은 탈아미노화되어 암모니아로 배출되므로 (Dame, 1996), 암모니아 배설물의 변화는 먹이변화 및 생리장애 등과 밀접한 관련이 있다. 우리 조사결과 암모니아 배설물은 전 조사기간 중 유의적인 변화가 없는 것으로 조사되었다. 비록 암모니아 배설물은 실험 초기 (1-2일) 에 수온에 따라 유의적인 차이가 있었지만 ($P < 0.05$), 6일 이후에는 거의 전 실험구에서 유의적 차이가 관찰되지 않았다. 따라서 진주조개는 동면상태에서도 지속적으로 대사산물을 배설하는 등 에너지 손실이 일어나므로 동면전의 영양상태에 따라 대량폐사가 발생할 수도 있음을 의미한다.

이때패류는 환경조건의 변화에 대해 섭이습성이나 흡수율의 변화를 통해 변화된 환경에 적응하는 것으로 알려져 있다 (Bayne et al., 1987; Hawkins et al., 1996; Iglesias et al., 1996; Norkko et al., 2005). 또한 이때패류의 *Abs. eff.*는 먹이 종류나 밀도와도 밀접한 관련이 있어 먹이밀도가 높아질수록 감소하는 것으로 알려져 있고 (Widdows, 1978; Griffiths and King 1979; Navarro and Winter, 1982; Bayne et al., 1989; Riisgad and Larsen, 2000; Sejr et al., 2004; Fernandez-Reiriz et al., 2005), 이는 과포만으로 인하여 섭취된 먹이가 장내 머무르는 시간이 짧아져 상대적으로 소화율이 감소하기 때문이라고 알려지고 있다 (Bayne et al., 1989). 그러나 종에 따라서는 먹이밀도와

뚜렷한 상관관계를 나타내지 않는 종들도 보고되고 있는데 (MacDonald et al., 1989; Zhuang and Wang, 2004), 이들 종들은 섭취율을 조절하여 과포만을 피하는 것으로 알려지고 있다 (Velasco, 2006). 진주조개도 수중의 유기현탁물질의 농도가 높을수록 흡수율이 감소하는 것으로 알려지고 있다 (Lucas, 2008). 우리 연구에서는 *I. galbana* 단일종을 10^5 cells ml⁻¹의 일정한 밀도로 급이하였고, 이는 일반적인 이때패류 먹이 효율성 실험시 사용되는 농도 범위에 속하는 것으로 판단된다 (Kim et al., 2007). 그러나 무엇보다 실내사육은 천연양성조건과 달리 하루중 몇 차례에 걸쳐 고밀도의 먹이를 급이하는 시스템을 유지하므로 우리의 먹이조건은 이러한 실내 양성시스템에 사용되는 먹이밀도와 유사하므로 실내월동 조건의 관점에서 보면 보다 재현성있는 데이터를 생산할 수 있을 것으로 생각된다.

한편 이때패류의 먹이효율에 막대한 영향을 주는 요인으로 위분생성을 들 수 있다. 위분생성은 먹이종류 (Shumway and Cucci, 1987; Alexander et al., 2008), 먹이밀도 (Epifanio and Ewart, 1977), 먹이생물의 사육상태 (Pales Espinosa et al., 2008), 부유물질의 함량 (Robinson et al., 1984; Ellis et al., 2002) 및 세포독성 (Hégaret et al., 2007; Galimany et al., 2008) 등 다양한 요인에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 우리가 사용한 *I. galbana* 종은 특수한 경우를 제외하고 (Guiliard, 1957), 세포 독성이 없는 것으로 알려져 있어 생물학적 독성에 의한 위분 생성 가능성은 없는 것으로 생각된다. Widdows et al. (1979)는 진주담치 (*Mytilus edulis*)는 5 mg L⁻¹의 seston 농도에서 위분을 생성하는 것으로 보고하고 있지만, Foster-Smith (1975)는 종에 따라 서로 다른 먹이밀도에 적응하는 방법이 다르고 하였다. 한편 Kim et al. (2007)은 참굴을 이용한 실험에서 10^5 cells ml⁻¹에서도 위분이 생성되지 않은 것으로 보고하고 있어, 위분생성은 사육환경에 따른 차이가 큰 것으로 판단된다. 한편 폐쇄수조 (Closed system)를 이용하는 실험방법과 달리 우리 연구는 flow-through chamber를 이용하여 해수 유동에 의해 위분이 소실되었을 가능성을 배제할 수 없다. 이를 위해 각각의 chamber의 배수구에는 별도의 침전조를 두어 배출수를 통해 유실될 수 있는 분이나 위분을 포집하고자 하였지만, 위분생성을 관찰할 수 없었고 대부분의 변은 chamber 내에 침하되어 있는 것으로 나타났다.

Kuwatani (1965)는 진주조개 (*P. fucatada martensii*) 성패에게 입경 2.5-25 μ m의 활성탄을 급이한 실험을 통해 길이 12.5 μ m, 폭 5 μ m의 입자를 보다 선호하는 것으로 밝혔다. 우리가 급이한 *I. galbana*는 선호하는 크기 범주에 속하며 (Chen 2003; Hur, 2003) 이때패류의 먹이로써 소화효율이 높은 것으로 알려지고 있다 (Hur, 2003).

흡수율은 여수율과 달리 수온과 같은 물리적 변화보다는 화학자극 (Jeong and Cho, 2007; Kim et al., 2007), 저산소환경 (Norkko et al., 2005) 및 주변 어류양식장 등에서 배출된 오염수 (Lefebvre et al., 2000) 등과 같은 보다 심각한 스트레스에 의해 변화가 일어나는 것으로 알려져 있다. 이는 그룹내 개체간 편차가 커 실제 평균값의 변화가 있어도 통계적 유의성을

기대하기가 어려운 특징이 있다 (Yukihira et al., 2000). 실제 우리 실험결과도 높은 변량으로 인하여 통계적 유의성을 찾기 어려웠다.

호흡량과 질소 배출량의 원자비로 대표되는 O:N 원자비는 에너지 대사에 단백질의 이용유무에 대한 상대적 지표를 제공하고, 탄수화물이나 지질의 대사보다 단백질 대사가 왕성할 때는 통상 O:N 원자비는 비교적 낮게 나타난다 (Phillips and Rainbow, 1994). 한편, 오랜 기간 절식시킨 담치에서는 탄수화물과 지질의 이화작용이 감소하고 단백질의 에너지 전환이 활성화됨으로써 O:N 원자비가 감소하는 것으로 보고하고 있다 (Bayne, 1976). 우리 조사에서 실험초기에는 O:N 원자비가 일정하게 유지되다가 저수온구인 8-10°C에서 실험 6일 이후 O:N 원자비가 급격하게 감소하는 것은 저수온에 의한 섭식활동 장애에 의한 것으로 판단된다. 한편 12-14°C에서는 꾸준하게 O:N 원자비가 유지되었다.

생물의 대사율을 측정하여 에너지수지를 가늠함으로써 성장잠재력을 나타내는 에너지수지(SFG)는 생태계 건전성을 위한 모니터링 도구 및 (Tsangaris et al., 2008) 실제 성장을 예측할 수 있는 유용한 도구가 되는 것으로 알려지고 있다 (Grant, 1996; Navarro et al., 2006). 따라서 실내월동기간중 발생할 에너지수지의 변화를 미리 산정한다면, 실내월동기간중의 성장을 예측할 수 있을 것이다. 실험기간동안 SFG의 변화는 수온에 따라 다소 다른 양상을 보였다. 8°C에서는 지속적으로 음의 SFG가 측정되어 지속적인 에너지 손실이 있었다. 10-12°C에서는 비록 양의 SFG로 에너지 획득이 일어나고 있음을 나타내지만, 실험기간 동안 지속적으로 에너지 획득량이 감소하는 것으로 보아 저수온에 의한 영향을 받고 있는 것으로 판단되었다. 하지만 14°C에서는 실험말기까지 유의적인 변화가 관찰되지 않아, 14°C가 실내월동을 위한 최저 수온으로 판단된다. 일반적으로 종묘배양장에서의 모패사육과정중 먹이공급은 하루 3-5회 급이하고, 급이이후 수질관리를 위해 환수가 이뤄지므로 하루중 계획되지 않는 절식기간이 포함된다. 따라서 이러한 절식기간중에는 실내사육중인 월동패는 상당한 수준의 에너지 손실이 일어나게 된다. 이러한 맹점을 극복하기 위해서는 자동화시스템을 도입하여 지속적으로 먹이를 공급해 주는 것이 가장 좋지만, 과도한 시설투자 비용이나 제한된 먹이공급능력 등을 고려하면 현실적으로 어려운 부분이 있다. 따라서 최적의 에너지 공급계획을 수립하기 위해서는 에너지수지를 산정하여 일중 먹이요구량에 대한 정보를 수립하고, 이로부터 먹이 공급량 및 공급방법(회수 및 시기 등)을 계획하여야 한다.

이상의 결과를 종합하면 진주조개의 실내월동을 위한 사육수온은 최저 14°C 이상을 유지하여야 할 필요가 있고, 일간 최소 에너지요구량은 8.00-34.24 (평균 17.67±6.17) J h⁻¹gDW⁻¹에 해당한다. 이는 *I. galbana* 단일종으로 급이한다고 가정하면 약 10⁵ cells ml⁻¹의 밀도로 5-6회 정도 급이하여야 충족시킬 수 있을 것으로 생각된다. 그러나 실제 배양장에서는 혼합먹이를 급이하고 있고 또한 각 종별 에너지 함량이 다르므로 각 배양장에 적합한 먹이공급계획을 수립하여 에너지 요구량

을 맞추는 전략적 접근이 요구된다. 우리의 연구결과는 2주간의 짧은 기간에 불과하므로 이후 보다 장기간의 모니터링을 통해 보다 엄격한 실내월동 기준을 확립하여야 할 것이다.

참고문헌

- Alexander JA, Stoecker DK, Meritt DW, Alexander ST, Padeletti A, Johns D, Van Heukelem L and Glibert PM. 2008. Differential production of feces and pseudofeces by the oyster *Crassostrea ariakensis* when exposed to diets containing harmful dinoflagellate and raphidophyte species. *J Shellfish Res* 27, 567-579.
- Baldwin LG and Kramer KJM. 1994. Biological early warning systems (BEWS). In: *Biomonitoring of coastal waters and estuaries*. CRC, Florida, U.S.A., 1-23.
- Bayne BL, Thompson RJ and Widdows J. 1973. Some effects of temperature and food on the rate of oxygen consumption by *Mytilus edulis* L. In: *Effects of Temperature on Ectothermic Organism: ecological implications and mechanisms of compensation*. Wieser W ed. Springer, Berlin, New York U.S.A., 181-193.
- Bayne BL. 1976. Physiological integrations. In: *Marine Mussels: Their ecology and physiology*. Bayne BL, ed. Cambridge University Press, New York, U.S.A., 261-292.
- Bayne BL and Newell RC. 1983. Physiological energetics of marine mollusca. In: *The mollusca*. Saleuddin A and Wilbur K eds. Academic press, New York, U.S.A., 407-515.
- Bayne BL. 1985. Physiological measurements. In: *The effects of stress and pollution on marine animals*. Bayne BL and Brown DA, eds. Praeger Scientific, New York, U.S.A., 3-45.
- Bayne BL, Hawkins AJS and Navarro E. 1987. Feeding and digestion by the mussel *Mytilus edulis* L. (*Bivalvia*: *Mollusca*) in mixtures of silt and algal cells at low concentrations. *J Exp Mar Biol Ecol* 111, 1-22.
- Bayne BL, Hawkins AJS, Navarro E and Iglesias IP. 1989. Effects of seston concentration of feeding, digestion and growth in the mussel *Mytilus edulis*. *Mar Ecol Prog Ser* 55, 47-59.
- Chen YC. 2003. Immobilized *Isochrysis galbana* (Haptophyta) for long-term storage and applications for feed and water quality control in clam (*Meretrix lusoria*) cultures. *J Appl Phycol* 15, 439-444.

- Conover RJ. 1966. Assimilation of organic matter by zooplankton. *Limnol Oceanogr* 18, 673-678.
- Cranford PJ. 2001. On evaluating the reliability of filtration rate measurements on bivalves. *Mar Ecol Prog Ser* 215, 303-305.
- Dame RF. 1996. System metabolism and nutrient cycling. In: *Ecology of Marine Bivalves: an Ecosystem Approach*. Dame RF ed. CRC Press, Florida, U.S.A., 143-167.
- Ellis J, Cummings V, Hewitt J, Thrush S and Norkko A. 2002. Determining effects of suspended sediment on condition of a suspension feeding bivalve (*Atrina zelandica*): results of a survey, a laboratory experiment and a field transplant experiment. *J Exp Mar Biol Ecol* 267, 147-174.
- Epifanio CE and Ewart J. 1977. Maximum ration of four algal diets for the oyster *Crassostrea virginica* Gmelin. *Aquaculture* 11, 13-29.
- Fernandez-Reiriz MJ, Navarro JM and Labarta U. 2005. Enzymatic and feeding behavior of *Argopecten purpuratus* under variation in salinity and food supply. *Comp. Biochem Physiol A Mol Integr Physiol* 141, 153-163.
- Filgueira R, Labarta U and Fernandez-Reiriz MJ. 2006. Flow-through chamber method for clearance rate measurements in bivalves: design and validation of individual chambers and mesocosm. *Limnol Oceanogr Methods* 4, 284-292.
- Foster-Smith RL. 1975. The effect of concentration of suspension on the filtration rates and pseudofaecal production for *Mytilus edulis* L., *Cerastoderma edule* (L.) and *Venerupis pullastra* (Montagu). *J Exp Mar Biol Ecol* 17, 1-22.
- Fujii T and Toda S. 1991. Open and close shell-movement of the mussel, *Mytilus edulis* L. under natural conditions. *Bull Natl Res Inst Aquaculture* 20, 33-40.
- Galtsoff PS. 1928. Experimental study of the function of the oyster gill and its bearing on the problems of oyster culture and sanitary control of the oyster industry. *Bull US Fish* 44, 1-39.
- Galimany E, Sunila I, Hegaret HE, Ram M and Wikfors GH. 2008. Pathology and immune response of the blue mussel (*Mytilus edulis* L.) after an exposure to the harmful dinoflagellate *Prorocentrum minimum*. *Harmful Algae* 7, 630-638.
- Gnaiger E. 1983. Calculation of energetic and biochemical equivalents of respiratory oxygen consumption. In: *Polarographic Oxygen Sensors*. Aquatic and Physiological Applications. Gnaiger E and Forstner H eds. Springer, Berlin, New York, U.S.A., 337-345.
- Grant J. 2000. The relationship of bioenergetics and the environment to the field growth of cultured bivalves. *J Exp Mar Biol Ecol* 200, 239-256.
- Griffiths CL and JA King. 1979. Some relationships between size, food availability and energy balance in the ribbed mussel *Aulacomia ater*. *Mar Biol* 51, 141-149.
- Guiliard HR. 1957. Some factors in the use of nanoplankton cultures as food for larval and juvenile bivalves. *Proc Nat Shellfish Assoc* 48, 134-142.
- Haven DS, Morales-Alamo R. 1970. Filtration of particles from suspension by the American oyster *Crassostrea virginica*. *Biol Bull Woods Hole* 139, 248-264.
- Hawkins AJS, Smith RFM, Bayne BL and Héral M. 1996. Novel observations underlying the fast growth of suspension feeding shellfish in turbid environments: *Mytilus edulis*. *Mar Ecol Prog Ser* 131, 179-190.
- Hégaret H, Wikfors G, Soudant P, Lambert C, Shumway S, Bérard J and Lassus P. 2007. Toxic dinoflagellates (*Alexandrium fundyense* and *A. catenella*) have minimal apparent effects on oyster hemocytes. *Mar Biol* 152, 441-447.
- Hur YB. 2003. Dietary value of microalgae for larvae culture of Pacific oyster, *Crassostrea gigas*. Ph.D. thesis, Pukyong National University, Pusan, Korea.
- Iglesias JIP, Urrutia MB, Navarro E, Alvarez-Jorna P, Larretxea X, Bougrier S and Héral M. 1996. Variability of feeding processes in the cockle *Cerastoderma edule* (L.) in response to changes in seston concentration and composition. *J Exp Mar Biol Ecol* 197, 121-143.
- Jeong JG, Seo YJ, Park JS, Pyo MG, Yun DH, Ji HS and Lee YG. 2005. Proposal for own label product of Tongyeong pearl. 21st Century Economy and Society Institute, Goyang, Korea.
- Jeong WG 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.
- Jiang, A-l, Lin J and Wang C-h. 2008. Physiological energetics of the ascidian *Styela clava* in relation to body size and temperature. *Comp Biochem Physiol A* 149, 129-136.

- Kim IO. 1969. Study on the culture of pearl oyster I. On the wintering and growth of pearl oyster, *Pinctada martensii*. Bull Nat Fish Res Dev Inst 4, 109-118.
- 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. Aquac Res 38, 1612-1618.
- Kuwatani Y. 1965. A study on feeding mechanism of Japanese pearl oyster, *Pinctada martensii* (Dunker), with special reference to passage of charcoal particles in the digestive system. Bull Jap Soc Sci Fish 31, 789-798.
- Langton RW. 1977. Digestive rhythms in the mussel *Mytilus edulis*. Mar Biol 41, 53-58.
- Lefebvre SA, Barill L and Clerc M. 2000. Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) feeding responses to a fish-farm effluent. Aquaculture 187, 185-198.
- Loosanoff VL. 1939. Effect of temperature upon shell movements of clams, *Venus mercenaria* (L.). Bio Bull 76, 171-182.
- Lucas JS. 2008. Feeding and Metabolism. In: The Pearl Oyster. Southgate PC and Lucas J eds. Elsevier, Oxford U.K., 103-180.
- MacDonald BA, Bacon GS and Ward JE. 1998. Physiological responses of infaunal (*Mya arenaria*) and epifaunal (*Placopecten magellanicus*) bivalves to variations in the concentration and quality of suspended particles II. Absorption efficiency and scope of growth. J Exp Mar Biol Ecol 219, 127-141.
- Nagai K, Honjo T, Go J, Yamashita H and Oh SJ. Detecting the shellfish killer *Heterocapsa circularisquama* (Dinophyceae) by measuring bivalve activity with a Hall element sensor. Aquaculture 225, 395-401.
- Navarro JM and Winter JE. 1982. Ingestion rate, assimilation efficiency and energy balance in *Mytilus chilensis* in relation to body size and different algal concentrations. Mar Biol 67, 255-266.
- Navarro JM, Urrutia GX and Carrasco C. 2006. Scope for growth versus actual growth in the juvenile predatory gastropod *Chorus giganteus*. J Mar Biol Assoc UK 86, 1423-1428.
- Norkko J, Pilditch CA, Thrush SF and Wells RMG. 2005. Effects of food availability and hypoxia on bivalves: the value of using multiple parameters to measure bivalve condition in environmental studies. Mar Ecol Prog Ser 298, 205-218.
- Numaguchi K. 1994. Effect of Water Temperature on the Filtration Rate of Japanese Pearl Oyster, *Pinctada fucata martensii*. Suisanzoshoku 42, 1-6.
- Pales Espinosa E, Allam B and Ford SE. 2008. Particle selection in the ribbed mussel *Geukensia demissa* and the Eastern oyster *Crassostrea virginica*: Effect of microalgae growth stage. Estuar Coast Shelf S 79, 1-6.
- Park KD. 2002. Overwintering of pearl oyster (*Pincta fucata martensii*). J Korean Aquac Soc 14, 67-74.
- Phillips DJH and Rainbow PS. 1994. Monitoring the effect of contaminants. In: Biomonitoring of Trace Aquatic Contaminants. Chapman & Hall, Bristol, U.K., 243-288.
- Riisgard HU and Larsen PS. 2000. Comparative ecophysiology of active zoobenthic filter feeding, essence of current knowledge. J Sea Res 44, 169-193.
- Riisgard HU. 2001. On measurement of filtration rates in bivalves: the stony road to reliable data: review and interpretation. Mar Ecol Prog Ser 211, 275-291.
- Robinson WE, Wehling WE and Morse MP. 1984. The effect of suspended clay on feeding and digestive efficiency of the surf clam, *Spisula solidissima* (Dillwyn). J Exp Mar Biol Ecol 74, 1-12.
- Sejr MK, Petersen JK, Jensen KT and Rysgaard SE. 2004. Effects of food concentration on clearance rate and energy budget of the Arctic bivalve *Hiatella arctica* (L) at subzero temperature. J Exp Mar Biol Ecol 311, 171-183.
- Shumway SE and Cucci TL. 1987. The effects of the toxic dinoflagellate *Protogonyaulax tamarensis* on the feeding and behaviour of bivalve molluscs. Aquat Toxicol 10, 9-27.
- Solorzano L. 1969. Determination of ammonia in natural waters by the phenol hypochlorite method. Limnol Oceanogr 14, 799-801.
- Sprung M. 1984. Physiological energetics of mussel larvae (*Mytilus edulis*). I. Shell growth and biomass. Mar Ecol Prog Ser 17, 283-293.
- Strickland JDH and Parsons TR. 1972. A practical handbook of seawater analysis. J Fish Res Board Can 167, 311.
- Tongyeong city. 2005. Cultural fisheries. In: Statistic

- of Tongyeong. Retrieved from <http://stat.tongyeong.go.kr/stat/view/default.asp>.
- Tsangaris C, Papthanassiou E and Nicolaidou A. 2008. Biochemical biomarkers and overall health status of mussels *Mytilus galloprovincialis* exposed to nickel and chromium. *Chem Ecol* 24, 315-327.
- Velasco LA. 2006. Effect of microalgal concentration and water temperature on the physiology of the Caribbean scallops *Argopecten nucleus* and *Nodipecten nodosus*. *J Shellfish Res* 25, 823-831.
- Widdows J. 1978. Combined effect of body size, food concentration and season on the physiology of *Mytilus edulis*. *J Mar Biol Assoc UK* 58, 109-124.
- Widdows J, Fieth P and Worrall CM. 1979. Relationships between seston, available food and feeding activity in the common mussel *Mytilus edulis*. *Mar Biol* 50, 195-207.
- Widdows J. 1985. Physiological procedures. In: *The Effects of Stress and Pollution on Marine Animals*. Bayne BL and Brown DA, eds. Praeger Scientific, New York, U.S.A., 161-178.
- Widdows J. 2001. Bivalve clearance rates: inaccurate measurements or inaccurate reviews and misrepresentation? *Mar Ecol Prog Ser* 221, 303-305.
- Winter JE. 1978. A review on the knowledge of suspension-feeding in lamellibranchiate bivalves, with special reference to artificial aquaculture systems. *Aquaculture* 13, 1-33.
- Yoo SK, Chang YJ and Lim HS. 1986. Growth comparison of pearl oyster, *Pinctada fucata* between the two culturing areas. *Bull Korean Fish Soc* 19, 593-598.
- Yoo SK. 2000. Pearl oyster. In: *Shallow Seawater Culture*. Kudeok Publ, Pusan, Korea, 159-186.
- Yu N and Culver DA. 1999. Estimating the effective clearance rate and refiltration by zebra mussels, *Dreissena polymorpha*, in a stratified reservoir. *Freshwater Biol* 41, 481-492.
- Yukihira H, Lucas JS and Klumpp DW. 2000. Comparative effects of temperature on suspension feeding and energy budgets of the pearl oysters *Pinctada margaritifera* and *P. maxima*. *Mar Ecol Prog Ser* 195, 179-188.
- Zhuang SH and Wang ZQ. 2004. Influence of size, habitat and food concentration on the feeding ecology of the bivalve, *Meretrix meretrix* Linnaeus. *Aquaculture* 241, 689-699.

2009년 9월 8일 접수
 2009년 12월 21일 수정
 2010년 2월 4일 수리