

수하식 개체굴 성장과 물리적 충격의 상호관계 연구

한종철¹, 김병관², 허영백³

¹국립수산과학원 중앙내수면연구소, ²국립수산과학원 수산자원연구부 수산공학과,
³국립수산과학원 남동해수산연구소 허영백

Study of the relationship between the growth of longline cultchless oyster and physical impact

Jongcheol Han¹, Pyoungkwon Kim² and Youngbaek Hur³

¹Inland Fisheries Research Institute, National Institute of Fisheries Science, Geumsan-gun 32762, Korea

²Fisheries Engineering Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

³Southeast Sea Fisheries Research Institute, National Institute of Fisheries Science Tong-yeong 53085, Korea

ABSTRACT

In Korea, Longline oyster farms are located near shipping routes, where continuous artificial waves are generated by the movement of ships, causing physical stress, known as the "tumbling" phenomenon, which has been reported to result in reduced growth. Therefore, to develop suitable suspended cutchless oyster farming techniques in the korea, the relationship between physical impacts and the growth of suspended cutchless oysters was investigated. The oysters in the 0 m and 1 m experimental groups showed higher growth in terms of condition index and flesh weight in April compared to other groups. Cutchless oysters in the suspended group exhibited relatively higher whole and flesh weights throughout the period, confirming faster growth compared to hanging cultured oysters. Shell height growth was recorded in the following order 3 m depth group, 1 m depth group, hanging cultured oysters and the 0 m depth group. This slow growth in the 0 m depth group appears to be due to damage to the shell edges caused by physical impacts. However, whole weight was similar in both the 1 m and 3 m depth groups, with the 0 m depth group showing relatively lower growth, apparently due to physical stress. This study confirmed shell edge damage and partial growth retardation of individual suspended oysters caused by physical impacts as a function of depth.

Keywords: Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, Cultchless oyster, Longline, Physical impact

서 론

굴은 수산물로 유일하게 동·서양 모두 생식을 하는 품종이며, 우리나라 굴 양식 생산은 연간 30만 톤 내외로 세계 2위 생산국가이다 (J-stat, 2023). 세계 굴 산업규모는 2022년 약 144조원으로 추정되고, 연간 성장률은 3.5%로 추정된다

(Grandviewresearch, 2024). 세계 굴 생산량은 1970-1980년대 약 4만 톤, 2000년 약 5만 톤까지 증가하였으나, 최근 생산량은 약 2.5만 톤 내외로 감소되는 경향을 보이고 있다 (J-stat, 2024). 즉, 세계 굴 산업 규모는 성장하고 있으나, 생산은 감소되는 것이다. 따라서 중국, 한국을 제외한 대부분의 굴 생산국가는 양적 성장 보다 질적 성장을 집중하고 있다. 대표적인 개체굴 양식 생산 및 수요지역인 유럽의 경우, 수입 (3.0 EUR/kg) 과 수출 (8.5 EUR/kg) 은 개체굴에 집중되어 있고, 알굴형태 가공상품은 수입 6.1-13.0 EUR/kg과 수출 4.0-10.1 EUR/kg 였다 (EUMOFA, 2022). 그러나 굴 가공상품 인건비, 재료비, 굴 수율 등을 고려할 경우, 알굴 가공품 보다 개체굴 부가가치가 더 높다 (NIFS, 2014).

우리나라 굴 양식은 지난 1907년, 한국어업법이 제정되면서 전남 지역을 중심으로 갯벌을 이용한 굴 양식이 시작되었

Received: September 20, 2024; Revised: September 24 2024;
Accepted: September 30, 2024

Corresponding author: Jongcheol Han

Tel: +82 (42) 750-0710, e-mail: han0624@korea.kr
1225-3480/24871

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.

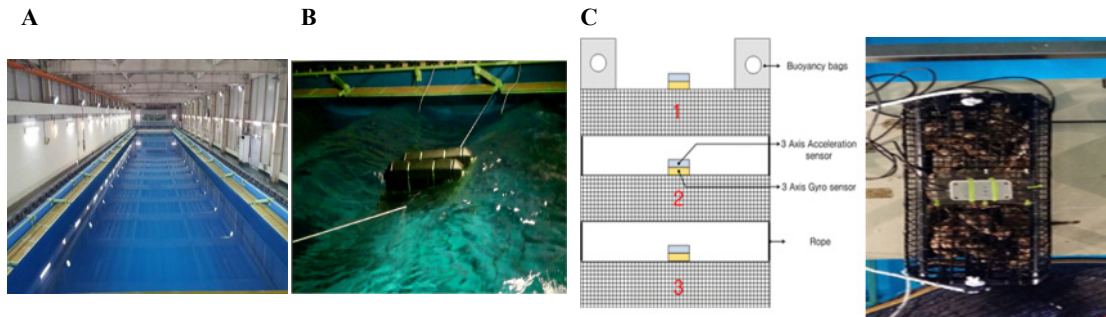


Fig. 1. Illustration of the procedure for conducting a physical test. (A) Image of wave basin, (B) equipment for exposure to artificial waves, (C) schematic diagram of experimental set-up.

다 (Han, 2005). 그러나 갯벌을 이용한 양식방법은 생산량 한계와 투석식의 초기 시설투자, 노동력 등의 문제가 있었다 (Choi and Ko, 1968). 이와 같은 이유로 공간을 입체로 활용 가능한 수하식 굴 양식방법의 연구가 1920년 후반 일본에서 Seno and Hori (1927) 에 의해 시작되었다. 우리나라는 1954년 수하식 양식법이 도입되었고, 1980년대 재료공학 발달에 따라 기존의 유리부이 대신 스티로폼 부이가 대량 보급되면서 현재와 같은 수하식 굴 양식법이 운영되고 있다 (NIFS, 2017). 수하식 굴 양식기술 보급은 우리나라 굴 양식 생산량이 1965년 4.4만 톤, 1985년 24만 톤으로 급증한 계기가 되었고, 인공종자 기술보급으로 굴 양식 생산량은 2017년 31만 톤, 이후 30만 톤 전후로 생산되고 있다. 그러나 최근 고령화 및 인건비 상승 등의 문제로 남해안에서는 개체굴 양식 기술 도입을 시도하고 있다.

개체굴은 알굴 생산과정과 달리 부착기질 (굴, 가리비 패각) 이 없어, 전용 사육장치에서 양성된다. 그러나 개체굴 생산 매커니즘은 부착 생태특성과 차이를 나타내어, 물리적인 고려가 필요하다. 기존 국외 연구에서는 환경특성 (Peterson and Black 1987, 1991; Bitshop and Peterson, 2006), 기자재 (Manley *et al.*, 2009; Mallet *et al.*, 2013; Walton *et al.*, 2013), 사육밀도 (Comeau *et al.*, 2011) 등을 연구한 사례는 다수가 보고되었다. 그러나 기존 연구는 조위 혹은 지형특성 영향을 보고한 것으로, 국내 수하식 양식장에서 개체굴 사육을 위한 기초자료로서는 부족하다.

우리나라 수하식 굴 양식장은 선박의 이동경로에 인접하여 지속적인 파도에 노출되고, 물리적 스트레스 “덩블링”현상이 발생할 것으로 보이며, 물리적 스트레스는 성장저하 문제와 관계된다 (Grant and Bacher, 2001; Gaurier *et al.*, 2011; Duarte *et al.*, 2014; Dong *et al.*, 2020; Campbell and Gray, 2024). 따라서 우리나라 남해안에 적합한 수하식 개체굴 양식기술 개발을 위하여 물리적 충격과 수하식 개체굴 성장의 상호관계를 조사하였다.

재료 및 방법

1. 물리적 충격 노출시험

개체굴 양성시스템의 물리적 충격 노출시험은 국립수산물학원 조파수동에서 2013년 6월에 실시하였다. 시험에 활용한 개체굴 사육용기는 시판중인 OysterGro사 (캐나다) 부유식 개체굴 양성시스템을 수하식 양식시스템에 적용 가능한 형태로 변경하였다. 조파수조는 길이 85 m, 폭 10 m, 깊이 3.5 m로, 개체굴 양성시스템 중앙부에는 자이로 센서를 부착하였고, 개체굴 양성시스템 계류는 표층, 수심 1 m, 수심 3 m의 조건으로 분석을 수행하였다 (Fig. 1).

개체굴 양성시스템에 노출한 인공파도는 파주기 (1.5, 2.0, 2.5 및 3.0 sec) 와 파고 (10, 20 및 30 cm) 였고, 자이로센서에서 측정된 3축 x, y, z의 가속도 ($|a|$) 합계를 속도 (v) 로 전환하였고, 충격량 (Force, N) 을 조사하였다.

$$|a| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (1)$$

$$v(t) = v_0 + \int_{t_0}^t a(t) dt \quad (2)$$

v(t) is velocity at time t, v₀ is the initial velocity at the initial time t₀, a(t) is the acceleration as a function of time a(t), $\int_{t_0}^t a(t) dt$ is the integral of acceleration from t₀ to t.

$$N = m \times \Delta v \quad (3)$$

m is mass of object, Δv is the change in velocity.

2. 수심별 수하식 개체굴 양성시스템 성장비교

수하식 개체굴 양성시스템은 2014년 2월에 경남 고성군 자란만 수하식 양식장에서 수행하였다. 시험에 사용한 개체굴은

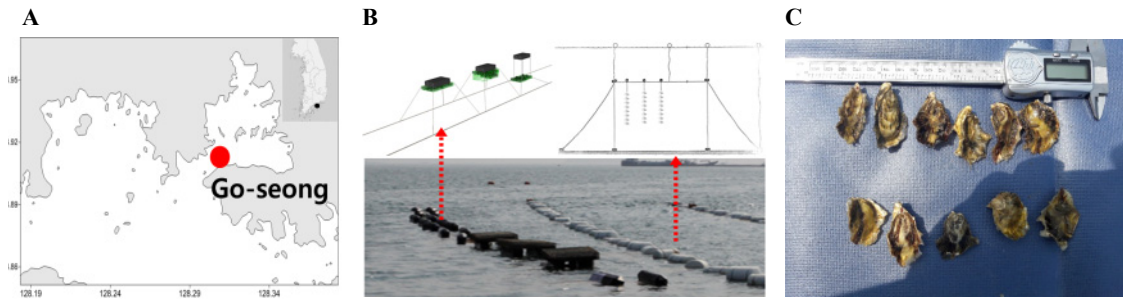


Fig. 2. A map showing the experimental site (left), actual image (center-lower) and schematic image (center-upper) of experimental facility and cultchless oyster seed for the experiment (right).

2013년 생산된 굴 자연산 종자로, 2014년 1월에 단련상에서 보관중인 굴을 탈락시켜 종자로 이용하였다. 이후 2주간 폐사된 개체를 제외하였고, 시험에 사용한 개체굴 종자는 각각 34.2 ± 11.4 mm, 입식밀도는 200 개체/케이지였다. 개체굴 양성은 Oystergro사 기자재 특성에 따라 수하연 연승 2줄에 개체굴 양성시스템을 체결하였고, 사육 수심은 표층, 1 m, 3 m 및 5 m에 시설하였다. 또한 기존 알굴 양성과 비교를 위해 연승수하식 굴 양식 시설을 하였다 (Fig. 2).

성장조사는 매일 1회 시험조사선을 이용하여, 현장에서 직접 확보하였다. 개체굴 시료는 실험구별 무작위로 30 개체를 회수하였고, 연승수하식 굴 1연, 6 m에 부착된 굴을 탈락시켜 회수 후 무작위로 30 개체 조사하였다. 버니어캘리퍼스를 사용하여 각고, 각장, 각폭을 0.01 mm까지 측정하였고, 전자저울을 이용하여 전중량과 육중량을 0.01 g까지 측정하였다. 비만도는 전중과 육중의 백분율로 계산하였고, 조사된 각고, 전중을 이용하여 일간성장률 (Daily Growth Rate, DGR) 을 조사하였다 (Degremont *et al.* (2010)). 생존율은 개체굴은 폐사된 개체를 직접계수하여 조사하였고, 수하연 굴은 부착기질에 부착된 개체를 계수하여 생존율을 기록하였다. 수온, 염분, 용존산소 및 pH는 시료확보 후 다항목수질측정기 (YSI, 560mds) 를 이용하여 측정하였다.

3. 통계처리

시험기간 동안 조사된 물리적 특성 등의 자료는 SPSS 20.0 (SPSS, Michigan Avenue, Chicago, IL, USA) 을 사용하여 One-way ANOVA-test를 실시한 후, Duncan test로 평균간 유의성 검증을 하였다 ($P < 0.05$).

결 과

1. 인공파도 조건에 따른 개체굴 양성시스템 물리적 특성

조파수조에서 개체굴 양성시스템을 계류하여 인공파도 (파고 10-30 cm, 파주기 1.5-3.0 sec) 와 수심에 따른 물리적 충

격을 조사한 결과를 Fig. 3에 표기하였다. 파고 10 cm일 때, 수심 0 m의 충격량은 1.07-3.10 N였고, 수심 1 m의 충격량은 0.57-1.49 N였고, 수심 3 m의 충격량은 0.61-1.48 N로 파주기가 길어지는 조건에서 충격량도 감소하는 것으로 조사되었다. 파고 20 cm일 때, 수심 0 m의 충격량은 2.08-4.85 N였고, 수심 1 m의 충격량은 1.09-2.97 N였고, 수심 3 m의 충격량은 1.05-2.41 N로 파고가 높아짐에 따라 충격량도 비례하여 증가하였다. 파고 30 cm일 때, 수심 0 m의 충격량은 3.21-7.80 N였고, 수심 1 m의 충격량은 1.87-3.15 N였고, 수심 3 m의 충격량은 1.81-2.83 N로 조사되었다. 조사결과, 파고와 수심은 밀접한 관계를 나타내었고, 파주기는 상대적으로 길어지는 실험조건에서 물리적 충격이 작은 것으로 조사되었다.

2. 수하식 개체굴 사육 수심별 특성비교

수하식으로 양성된 굴의 각고 변화는 개체굴의 경우, 지속적인 성장하는 경향을 나타내었다. 실험종료 시기 10월의 개체굴 수심 1 m 실험구는 각각 122.4 ± 22.5 mm, 개체굴 수심 3 m 실험구는 각각 126.2 ± 19.7 mm였다. 그러나 개체굴 수심 0 m 실험구는 5월 이후 성장이 타 실험구 보다 상대적으로 느린 것으로 조사되었다. 시험종료 시기의 수하연 굴은 각각 108.4 ± 20.2 mm로 개체굴 수심 1 m, 3 m 실험구 각고보다 느린 성장을 보였다 (Fig. 4-A). 개체굴 수심 0-3 m 실험구의 각장은 69.0 ± 14.2 - 73.4 ± 13.8 mm였고, 수하연굴은 각장 51.2 ± 18.7 mm로 차이가 있었다 ($P < 0.05$)(Fig. 4-B). 또한 개체굴 실험구 각폭의 변화는 각장과 유사한 경향을 나타내어, 개체굴 수심 0-3 m 실험구가 각폭 41.1 ± 8.2 - 43.2 ± 7.6 mm였고, 수하연굴은 각폭 36.6 ± 6.4 mm로 차이가 있었다 ($P < 0.05$)(Fig. 4-C).

수하식 개체굴 수심 0-3 m 실험구의 전중 변화는 시험기간 동안 유사한 수준으로 78.1 ± 21.4 - 84.5 ± 23.2 g였으나, 수하연 굴의 전중은 62.4 ± 17.8 g로 개체굴 실험구와 차이가 있었다 (Fig. 5-A). 육중은 개체굴 수심 0-3 m 실험구 간의 매일 유사한 수치로 성장하여, 10월 26.5 ± 7.1 - 28.1

개체굴 (*Crassostrea gigas*) 성장과 물리적 충격 상호관계

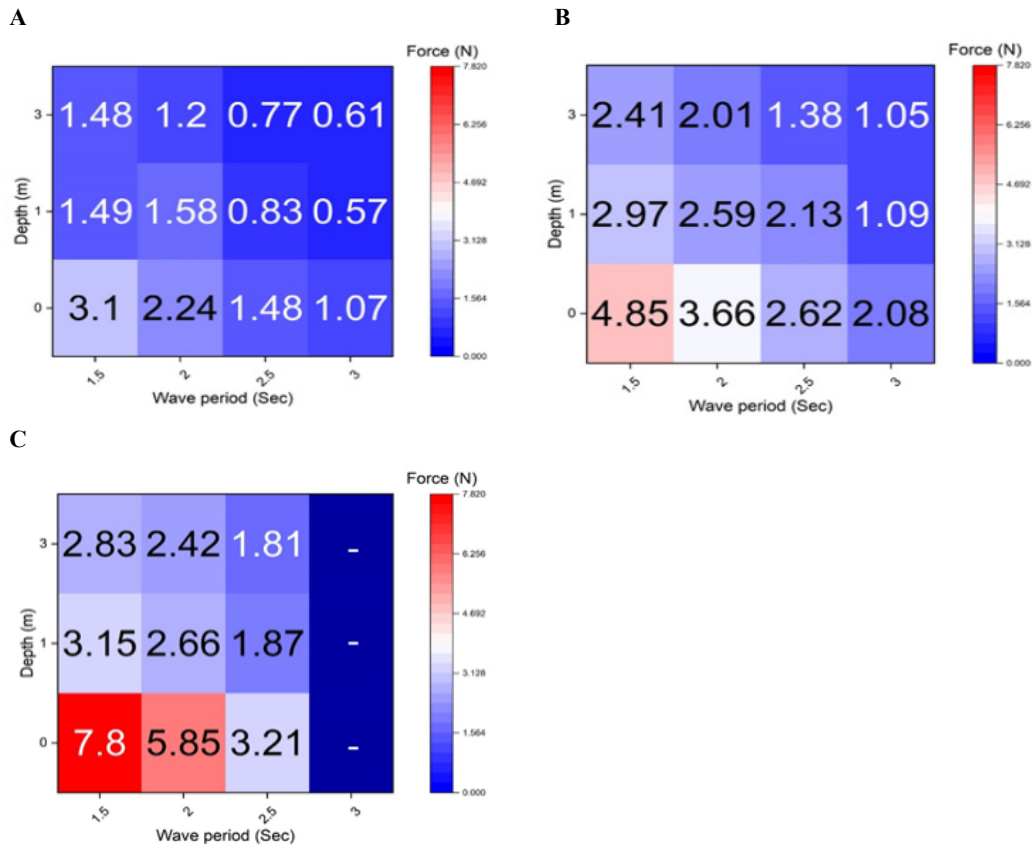


Fig. 3. Results of the physical impact analysis for different wave periods, water depth (0-3 m) under a wave height condition. (A) Wave height of 10 cm, (B) wave height of 10 cm, (C) wave height of 30 cm.

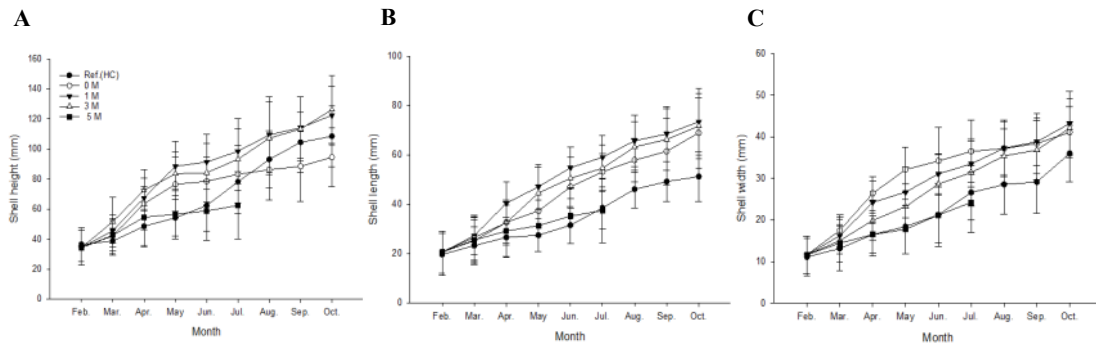


Fig. 4. Monthly change of Shell height (A), length (B), width (C).

± 8.5 g을 기록하였다. 수하연 굴의 경우 5월 이후에도 지속적인 성장을 하여 10월 육중 24.1±7.3 g으로 개체굴 성장과 유사하였다 (Fig. 5-B). 비만도는 개체굴 수심 0-1 m 실험구가 4월 47.1-49.2%로 가장 높았으며, 이후 감소하여 9월부터 다시 증가하는 것으로 조사되었다. 반면 수하식 굴은 비만도가 8월에 가장 높은 41.1%로 개체굴 29.4-30.8%로 차이가 있었다 (Fig. 5-C).

수하식 개체굴은 수심에 따라 각고의 일간성장률은 실험구 간 차이가 있으나, 5월에 감소하고, 7월에 증가하는 경향은 실험구 간 유사한 패턴을 나타내었다. 하지만 수하연 굴의 경우, 각고의 일간성장률은 6월 7.1%, 개체굴은 -1.3-3.5%로 차이가 있었다. 시험 기간 동안 가장 높은 각고의 일간성장률은 수하연 굴이 7월 9.2%, 개체굴 수심 0-3 m 실험구 4월 10.2-10.3%로 수하연 굴의 각고 일간성장률은 더 높은 것

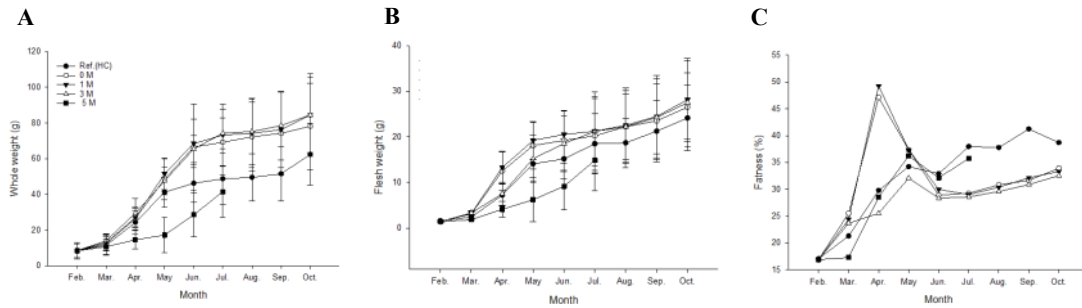


Fig. 5. Monthly change of whole weight (A), flesh weight (B), fatness (C).

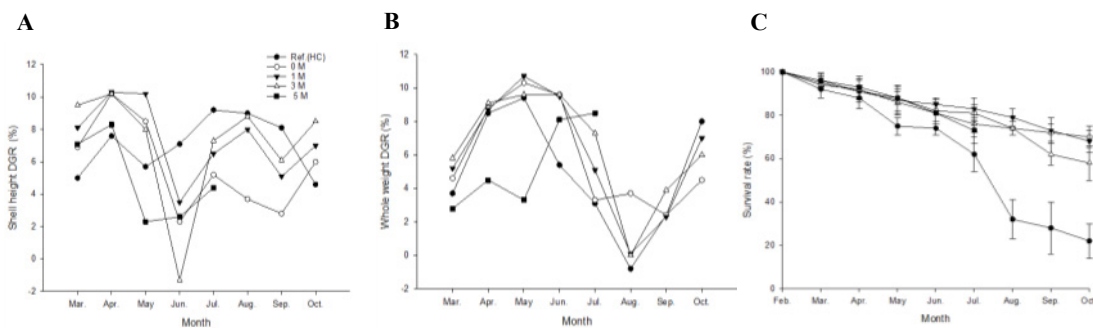


Fig. 6. Change in the DGR of shell height (A), whole weight (B) and survival rate (C).

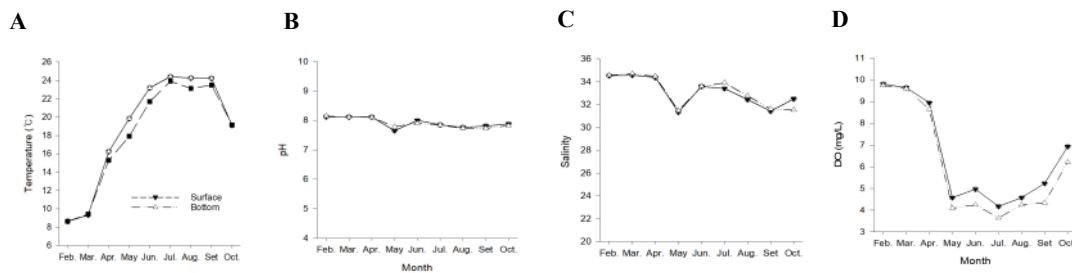


Fig. 7. Comparison of water quality for temperature (A), salinity (B), pH (C) and DO (D).

로 확인되었다 (Fig. 6-A). 반면 전종의 일간성장률은 개체굴 수심 5 m 실험구는 타 실험구와 다른 패턴을 나타내었고, 수하식 굴 생산방법은 8월에 대부분 전종의 일간성장률이 가장 낮고, 실험구간 유사경향을 나타내고 있다 (Fig. 6-B). 시험기간 동안 생존율은 개체굴 수심 5 m 실험구는 7월에 대량폐사하였다. 그러나 최종 생존율은 개체굴 수심 3 m 실험구가 58%로 가장 낮았다. 반면 개체굴 수심 0-1 m 실험구는 생존율 68-71%였고, 수하연 굴의 생존율 $22.6 \pm 8.4\%$ 는 개체굴 수심별 실험구간 차이를 나타내었다 (Fig. 6-C).

실험기간 동안 수온변화는 8.6-24.4°C였고, 5월 이후 표층과 저층은 수온차이가 있었다. 그러나 10월부터 수온은 표층과 저층 모두 19.1°C로 차이는 없었다 (Fig. 7-A). pH는 3월까지 8.1로, 7-9월 7.6-7.8로 하절기 동안은 차이가 있었다

(Fig. 7-B). 염분은 2월에서 4월까지는 염분 34로 조사되었으나, 5월 이후 31.3-33.4로 월별 염분차이는 일부 있었다 (Fig. 7-C). 용존산소 범위는 4.1-9.8 mg·L⁻¹로 시험기간 동안 수온에 따라 변화하였고, 6월부터는 용존산소가 5 mg·L⁻¹이하였고, 9월에는 5 mg·L⁻¹이상으로 조사되었다.

고찰

수하식 굴 양식법은 1920년대 일본에서 최초로 고안되었으며, 우리나라에서는 1930년 땃목식 수하식 굴 양식법이 도입되었다. 그러나 수하식 굴 양식이 산업화 된 것은 1980년대 스티로폼 부이가 대량 공급되면서 현재와 같은 연승수하식 굴 양식의 모습을 보이게 되었다. 개체굴은 서구사회 중심으로

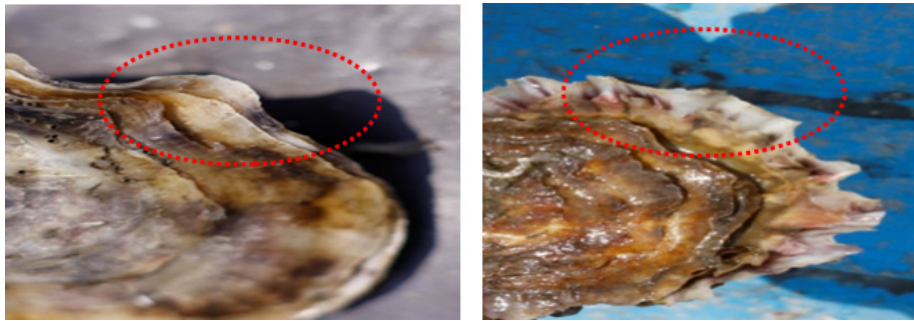


Fig. 8. Photo of shell edge difference by experimental condition.

생산되고 있었고, 대부분 갯벌에서 생산하고 있어, 국내 굴 양식 주된 방법과는 차이가 있다 (Park *et al.*, 2018). 굴은 고착성 생활사와, 여과섭이 생태특징이 있다. 이와 더불어 굴은 외부 환경 스트레스에 대응하기 위해 패각을 닫아 저항하는 특성이 있다 (Charifi *et al.*, 2018). 이러한 생태학적 특성에 따라 패각이 열려있지 않을 경우, 굴의 성장은 정상적으로 성장할 수 없다. 우리나라 굴 양식장은 항로와 인접하고 (Jeong *et al.*, 2009), 선박운행에 따른 굴 성장저해 스트레스는 지속적으로 발생할 수 밖에 없는 필연적인 구조이다.

이 연구에서 물리적 충격에 대한 특성을 확인하기 위해, 연안환경에서 발생 가능한 인공파도 (파고 10-30 cm, 파주기 1.5-3.0 sec) 를 개체굴 양식 시스템에 노출한 결과는 Fig. 3 과 같고, 물리적 충격은 수심, 파고에 비례하고, 파주기와는 반비례 관계를 나타내었다. 개체굴 양식 시스템을 현장에 적용한 결과에서, 성장은 개체굴 수심 1 m와 수심 3 m 실험구는 각고, 전중, 육중 모두 유사한 성장경향을 나타내었다 (Fig. 4, Fig. 5). 즉, 인공파도에서 조사된 수심별 개체굴 물리적 충격량 변화와 개체굴 성장이 유사하다는 점을 시사하고, 높은 파도 에너지가 굴 성장을 저해한다는 연구결과와 일치한다 (Mallet *et al.* 2003, 2013; Bishop and Hooper 2005). 그러나 개체굴 수심 5 m 실험구는 4월 이후 타 실험구 보다 상대적으로 느린 성장을 보였고, 일간성장률과 비만도도 개체굴 수심 0-3 m 실험구보다 낮은 수치를 보였다.

실험기간 어장의 수온, 염분, DO 및 pH는 일반적인 수하식 굴양식장의 수질환경과 유사하였으나, 수하연 굴의 성장을 조사한 타 연구결과에서 수심 중심부 보다 저층의 굴 성장이 부진한 것은, 본 연구의 개체굴 수심 5 m 실험구 성장과 유사한 경향을 나타내었다 (Lee, 1999). 또한 개체굴 수심 5 m 실험구의 낮은 성장은 물리적 충격 이 외에도 환경적인 요인을 고려할 필요가 있는 점을 시사한다.

굴의 성장은 수온, 염분, 먹이생물, 유전형질 및 사육환경 등 다양한 요인에 의해 차이가 발생한다 (Bourles *et al.*, 2009). Fig. 5에 표기한 바와 같이, 수하식 개체굴 수심 0 m

실험구와 1 m 실험구의 4월 비만도, 육중량은 타 실험구 보다 성장이 높았다. 특히 수하연 굴 보다 개체굴 실험구는 전 기간 동안 전중과 육중은 상대적으로 높아 연승수하식 굴 보다 빠른 성장을 확인하였다. 또한 개체굴 수심 5 m 실험구는 8월에 대량폐사로 실험종료 하였으나, 연승수하연 굴의 경우 빈산소 수괴현상에 노출될 경우, 연승 아래에서 발생한 폐사가 지속적되어 전체가 폐사하는 문제점이 있었다 (Han *et al.*, 2013). 그러나 수하식 개체굴 수심 0-3 m 실험구에서는 대량폐사가 관찰되지 않았다. 따라서 개체굴 적정수심을 고려할 때, 생물학적 요인을 고려한다면 수심 0-3 m가 적절한 것으로 판단된다.

우리나라 남해안의 주요 굴 양식방법은 수하식이며, 연안항로는 양식시설과 근접한 위치에 시설되어 있다 (Yoo and Jeong, 2020). 이 연구에서 실험종료 시에 각고성장은 수하식 개체굴 수심 3 m 실험구, 수심 1 m 실험구, 수하연 굴, 수심 0 m 실험구 순으로 조사되었다. 이러한 이유는 물리적 충격에 의해 패각 끝부분이 손상되어, 수치상 성장이 느린 것으로 보인 이유로 판단된다 (Fig. 8). 그러나 전중은 수심 1 m 실험구와 수심 3 m 모두 유사하고, 수심 0 m 실험구는 상대적으로 낮은 성장의 결과를 보여 물리적 충격에서 기인된 것으로 보인다. 앞서 Fig. 8에 표기한 것과 같이 물리적 충격으로 패각손상이 확인되고, 방어활동에 의한 패각 닫음이 성장차이를 나타낸 것으로 보인다 (Charifi *et al.*, 2018).

이 연구로 수심에 따른 물리적 충격은 개체굴 패각 손상과 일부 성장지연이 확인되었다. 또한 생물학적 관점에서도 개체굴 시설에 대한 고려가 필요한 점을 확인하였다. 따라서 수하식 개체굴 수심은 0-3 m까지는 적절한 것으로 보여진다. 그러나 물리적 요인에는 수류의 흐름 등을 고려가 되어야 정확한 성장모델관계가 성립될 것으로 보인다. 따라서 추후 연구에서는 수류의 흐름과 물리적 충격 상호관계를 규명할 수 있는 시험이 필요할 것으로 판단된다.

요 약

우리나라 수하식 굴 양식장은 선박 등의 이동경로에 인접하여 인위적인 파도가 지속적으로 발생되고, 물리적 스트레스 “딩블링”현상이 성장저하로 이어지는 문제점이 보고된 사례가 있다. 따라서 우리나라 남해안에서 적합한 수하식 개체굴 양식기술 개발을 위하여 물리적 충격과 수하식 개체굴 성장의 상호관계를 조사하였다.

수하식 개체굴 수심 0 m 실험구와 1 m 실험구의 4월 비만도, 육중량은 타 실험구 보다 성장이 높았다. 수하연 굴 보다 개체굴 실험구는 전 기간 동안 전중과 육중은 상대적으로 높아 연승수하식 굴 보다 빠른 성장을 확인하였다. 각고성장은 수하식 개체굴 수심 3 m 실험구, 수심 1 m 실험구, 수하연 굴, 수심 0 m 실험구 순으로 조사되었다. 이러한 이유는 물리적 충격에 의해 패각 끝부분이 손상되어, 수치상 성장이 느린 것으로 보인다. 그러나 전중은 수심 1 m 실험구와 수심 3 m 모두 유사하고, 수심 0 m 실험구는 상대적으로 낮은 성장의 결과를 보여 물리적 충격에서 기인된 것으로 보인다. 이 연구로 수심에 따른 물리적 충격으로 개체굴 패각 손상과 일부 성장지연도 확인하였다.

사 사

이 논문은 국립수산물연구원 수산과학연구사업 (R2024020)의 지원으로 수행된 연구이며 연구비 지원에 감사드립니다.

REFERENCES

- Bishop, M., Hooper, P.J., (2005) Flow, stocking density and treatment against *Polydora* spp.: influences on nursery growth and mortality of the oysters *Crassostrea virginica* and *C. ariakensis*. *Aquac.*, **246**: 251-261.
- Bishop, M.J. and Peterson, C.H., (2006) Direct effects of physical stress can be counteracted by indirect benefits: oyster growth on a tidal elevation gradient. *Oecologia*, **147**: 426-433
- Bourles, Y., Alunno-Bruscia, M., Pouvreau, S., Tollu, G., Leguay, D., Arnaud, C. and Kooijman, S. A. L. M., (2009) Modelling growth and reproduction of the Pacific oyster *Crassostrea gigas*: advances in the oyster-DEB model through application to a coastal pond. *Jour. Sea Research*, **62**: 62-71.
- Campbell, B. and Gray, M.A., (2024) Evaluating the influence of cage motion on the growth and shell characteristics of oysters (*Crassostrea virginica*) among several gear type. *Aquaculture*, **579**: 740223.
- Charifi, M., Miserazzi, A., Sow, M., Perrigault, M., Gonzalez, P., Ciret, P. and Massabuau, J.C., (2018) Noise pollution limits metal bioaccumulation and growth rate in a filter feeder, the Pacific oyster *Magallana gigas*. *PloSone*, **13**: e0194174.
- Choi, K.S. and Ko, N.P., (1968) An observation on the rock method oyster culture. *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **1**: 259-266.
- Comeau, L.A., Arsenault, G. and Davidson, T.J., (2011) Off-bottom oyster (*Crassostrea virginica* Gmelin) culture in Prince Edward Island: an evaluation of seed sources and stocking density. *Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci.* **2976**.
- Dégremont, L., Bédier, E. and Boudry, P., (2010) Summer mortality of hatchery-produced Pacific oyster spat (*Crassostrea gigas*). II. Response to selection for survival and its influence on growth and yield. *Aquaculture*, **299**: 21-29.
- Dong, S., You, X. and Hu, F., (2020) Effects of wave forces on knotless polyethylene and chain-link wire netting panels for marine aquaculture cages. *Ocean Eng.* **207**, 107368. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107368>.
- Duarte, P., Alvarez-Salgado, X.A., Fernández-Reiriz, M.J., Piedracoba, S. and Labarta, U., (2014) A modeling study on the hydrodynamics of a coastal embayment occupied by mussel farms (ría de Ares-Betanzos, NW Iberian Peninsula). *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **147**: 42-55. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.05.021>.
- EUMOFA, (2020) European market observatory for fisheries and aquaculture products. ISBN 978-92-76-47615-3.
- Gaurier, B., Germain, G., Kervella, Y., Davourie, J., Cayocca, F. and Lesueur, P., (2011) Experimental and numerical characterization of an oyster farm impact on the flow. *Eur. J. Mech. B/Fluids*, **30**: 513-525.
- Grant, J. and Bacher, C., (2001) A numerical model of flow modification induced by suspended aquaculture in a Chinese bay. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **58**: 1003-1011. <https://doi.org/10.1139/cjfas-58-5-1003>.
- Grandviewresearch, (2024) Oyster and Clam market analysis report, <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/oyster-clam-market-report>.
- Han, J.C., Jo, Q.T., Park, Y.C., Park, T.G., Lee, D.C. and Cho, K.C., (2013) A report on the mass summer mortalities of the farmed Pacific oysters, *Crassostrea gigas* and Bay scallops *Argopecten irradians* in the local waters of Goseong Bay, Korea. *The Korean Journal of Malacology*, **29**: 239-244.
- Han, S.M., (2005) A study on the development process of the oyster hanging aquaculture. Master Dissertation, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea, 1-30
- Jeong, W.G., Cho, S.M., and Lee, S.J., (2009) Studies for the sustainable management of oyster farms in Pukman Bay, Korea: estimate of primary production. *Fisheries and Aquatic Sciences*, **12**: 111-117.
- J-stat, (2023) J-stat Fishery and Aquaculture Statistics. Global aquaculture production 1950-2021(FishStatJ).
- John M.C. and Jeff C.C. (2019) Scaredy-Oysters: In Situ Documentation of an Oyster Behavioral Response to Predators. *Southeastern Naturalist* **18**, <https://doi.org/10.1656/058.018.0303>.
- Lee, C.H., (1999) Growth and reproduction of the Pacific

개체굴 (*Crassostrea gigas*) 성장과 물리적 충격 상호관계

- oyster, *Crassostrea gigas* at Kamakman in Yeosu. Master Dissertation, Jeju National University, Korea, 16-23.
- Mallet, A.L., Carver, C.E. and Hardy, M. (2009) The effect of floating bag management strategies on biofouling, oyster growth and biodeposition levels. *Aquac.* **287**: 315-323.
- Manley, J., Power, A. and Walker, R., (2009) Comparison of techniques for off-bottom culture of the eastern oyster, *Crassostrea virginica* (Gmelin, 1791), in Georgia. Occasional Papers of the University of Georgia Marine Extension Service 6, 18 pp.
- NIFS, (2014) Research for the productivity improvement of pacific cupped oyster, *Crassostrea gigas* on tidal flats of the West sea, Korea. Annual report. 16-22.
- NIFS, (2017) Aquaculture technology development for individual and triploid oyster in the suspended cages and longlines. Final report, 6 pp.
- Park, M.S., Do, Y.H. and Ro, S.W., (2018) Development Direction of Individual Oyster Aquaculture Industry in Korea. The Korea Society for Fisheries and Marine Science Education, 30: 913-92.
- Peterson, C.H. and Black, R., (1987) Resource depletion by active suspension feeders on tidal flats: influence of local density and tidal elevation. *Limnol Oceanogr.* **32**: 143-166.
- Peterson, C.H. and Black, R., (1991) Preliminary evidence for progressive sestonic food depletion in incoming tide over a broad tidal sand flat. *Est Coast Shelf Sci.* **32**: 405-413.
- Seno, H., and Hori J. (1927) A new method for fattening of oyster. *Jour. Imp. Fish. Inst.*, **22**: 69-72.
- Walton, W.C., Davis, J.E. and Supan, J.E., (2013) Off-Bottom Culture of Oysters in the Gulf of Mexico, 4308. *Southern Regional Aquaculture Center*, 1-6.
- Yoo, S.L. and Jeong, J.C., (2020) Safe navigation distance between marine routes and aquaculture farms in South Korea using Gaussian mixture model. *Sensors*, 20, 1246 pp.