

# 서해안 고유속 개방해역 환경에서 사육된 참굴과 키조개의 노로바이러스 모니터링

노시은<sup>1</sup>, 김영욱<sup>1</sup>, 이동현<sup>1</sup>, 박서연<sup>1</sup>, 이희중<sup>2</sup>, 황진익<sup>3</sup>, 박경일<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>군산대학교 해양·바이오특성화 대학 수산생명의학과, <sup>2</sup>국립수산과학원 남동해수산연구소, <sup>3</sup>국립수산과학원 기후연구부, <sup>4</sup>군산대학교 해상풍력수산업연구단

## Norovirus surveillance in Pacific oysters and pen shells cultured in a high-energy open-water aquaculture farm on the west coast of Korea

Si Eun Noh<sup>1</sup>, Young-Uk Kim<sup>1</sup>, Donghyun Lee<sup>1</sup>, Seoyeon Park<sup>1</sup>, Hee-Jung Lee<sup>2</sup>, Jin Ik Hwang<sup>3</sup> and Kyung-Il Park<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Department of Aquatic Life Medicine, College of Ocean & Bioscience, Kunsan National University, Gunsan 54150, Republic of Korea

<sup>2</sup>South East Sea Fisheries Research Institute, NIFS, Tongyeong 39769, Republic of Korea

<sup>3</sup>Ocean Climate and Ecology Research Department, NIFS, Busan 46083, Republic of Korea

<sup>4</sup>Research Institute of Fisheries Science in Offshore Wind Farms (RIFO), Kunsan National University, Gunsan 54150, Republic of Korea,

### ABSTRACT

This study evaluated norovirus detection in bivalves collected from a high-energy open-water (HEO) aquaculture farm located approximately 15 km offshore from Gusipo on the west coast of Korea and from comparative coastal sites. Diploid and triploid Pacific oysters (*Crassostrea gigas*) and pen shells (*Atrina pectinata*) cultured at the HEO farm, together with wild oysters from Gochang and farmed oysters from Geoje and Goheung, were analyzed for norovirus GI and GII by one-step RT-qPCR from July 2024 to November 2025. To accommodate differences in study objectives and sample characteristics, the survey was conducted in three sequential phases consisting of preliminary pooled screening, individual-based confirmation, and long-term pooled monitoring. No norovirus was detected in any shellfish samples collected from the HEO farm throughout the 17-month survey period, including the winter season when norovirus contamination is generally more prevalent. In contrast, wild diploid oysters from Gochang tested positive for both GI and GII in January 2025, and farmed diploid oysters from Geoje tested positive for GII in February and March 2025. Farmed triploid oysters from Goheung remained negative throughout the monitored period. These findings indicate that shellfish produced in the offshore HEO environment had no detectable norovirus during the study period and suggest that such environments, being physically separated from land-based contamination sources, may represent a lower-risk setting for shellfish production with respect to norovirus contamination.

**Keywords:** Norovirus; High-energy open-water (HEO); *Crassostrea gigas*; *Atrina pectinata*; RT-qPCR; shellfish surveillance

Received: May 14, 2026; Revised: May 20, 2026; Accepted: May 29, 2026

Corresponding author: Kyung-Il Park

Tel: +82 (63) 469-1882, e-mail: kipark@kunsan.ac.kr  
1225-3480/24916

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.

### 서론

노로바이러스 (Norovirus) 는 Caliciviridae과에 속하는 단일 가닥 (single-stranded) 양성 센스 RNA 바이러스로, 전 세계적으로 비세균성 급성 위장염을 일으키는 가장 대표적인 원인체이다 (Burkhardt and Calci, 2000; Glass *et al.*, 2009). 이 바이러스는 60°C에서 30분간 가열하거나 일반 수돗물의 염소 농도 수준에서는 불활성화되지 않을 만큼 물리·

화학적 환경 저항성이 매우 강하며, 단 10-100개의 미량 입자만으로도 감염을 유발할 수 있는 강력한 전염력을 지니고 있어 공중 보건학적으로 매우 중요하다 (Burkhardt and Calci, 2000; Kim, 2013). 노로바이러스는 유전적 특성에 따라 GI에서 GX까지 총 10개의 유전자군 (Genogroup) 으로 분류되며, 그중 GI과 GII 유전자군은 전 세계 인체 감염 및 패류 관련 식중독 사고의 대부분을 차지하는 주요 유전자군으로 알려져 있다 (Zheng *et al.*, 2006; Patel *et al.*, 2009; Chhabra *et al.*, 2019).

이러한 바이러스의 특성은 국내 참굴 생산의 중심지인 남해안 연안 해역의 위생 관리와도 직결된다. 실제로 2024년 해당 해역에서 노로바이러스가 검출되었을 당시, 미국 식품의약국 (FDA)의 수출 중단 조치로 인해 약 600만 달러 이상의 막대한 경제적 피해가 발생한 바 있다 (FDA, 2024). 이러한 바이러스 오염은 주로 하수처리장이나 정화조 등에서 직접 배출되는 인간 분변 등 육상 기원 오염물질의 유입에 의해 발생하며 (Mathijs *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2016), 한 번 농축된 바이러스는 9일간의 정화 작업 후에도 유의미하게 감소하지 않을 만큼 제거가 어렵다 (McLeod *et al.*, 2017; Battistini *et al.*, 2021). 또한 노로바이러스는 해안 환경에서 광범위하게 확산될 수 있으며, 대장균 기준을 충족하는 해역에서조차 바이러스 오염이 지속될 수 있다 (Campos *et al.*, 2015). 따라서 패류 위생 관리의 핵심은 바이러스 유입 자체를 차단하는 사전 예방적 양식 환경 구축에 있다 (Hewitt *et al.*, 2009).

국내 수산 양식 산업에서 참굴 (*Crassostrea gigas*) 은 한국의 대표적인 패류 수출 품목이며, 키조개 (*Atrina pectinata*) 는 대형 패류로서 상1업적 가치가 매우 높은 자원이다. 이들 이매패류는 아가미를 통한 활발한 여과 섭식 (Filter-feeding) 과정을 통해 해수 중의 유기물을 섭취하는데, 이 과정에서 주변 해수에 저농도로 존재하는 바이러스 입자가 소화맹장 (Digestive gland) 내에 수백 배 이상 생물 농축될 위험이 크다 (Burkhardt and Calci, 2000; Le Guyader *et al.*, 2006; Le Guyader *et al.*, 2012). 따라서 이들 주요 경제성 패류의 위생학적 안전성 확보는 국내 수산업의 경쟁력과 직결된다.

그러나 연안 양식 환경은 육상 오염원의 지속적인 유입과 기후 변화로 인해 위생 관리의 한계에 직면해 있다. 이에 대한 대안으로 주목받는 고유속 개방해역 (HEO; High Energy Open-water environment) 양식은 원활한 조류 소통으로 오염물질 희석 효과가 뛰어나며, 육상으로부터 원거리에서 위치하여 인간 활동의 영향권에서 물리적으로 분리되어 있어 위생학적 안전성이 높을 것으로 기대된다.

본 연구의 대상 양식장은 고창군 구시포 해안선으로부터 약 15 km 떨어진 고유속 환경에 위치하여 육상 오염원의 영향을

구조적으로 최소화할 수 있는 입지 조건을 갖추고 있다. 그러나 이러한 환경에서 생산된 패류의 노로바이러스 오염 실태에 관한 연구는 현재까지 수행된 바 없으며, 연안 양식 환경 및 자연 서식지와 체계적인 비교 자료 또한 부재한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 HEO 양식장에서 양식된 2배체 및 3배체 참굴과 키조개를 대상으로 노로바이러스 오염 실태를 조사하고, 이를 연안 해역의 자연산 및 양식 참굴과 비교하여 종별, 시기별, 해역별 검출 여부를 평가함으로써 HEO 양식 환경의 위생학적 안전성을 검토하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 연구설계 및 시료 채집

본 연구는 고유속 개방해역 (HEO) 양식장과 비교 연안 해역에서 채집된 이매패 시료의 노로바이러스 오염 여부를 시계열적으로 확인하기 위하여 수행되었다. 참굴 (*C. gigas*) 은 2024년 7월부터 2025년 11월까지 각고 16.2-119.6 mm 범위의 개체를 채집하였으며, 키조개 (*A. pectinata*) 는 2024년 7월부터 2025년 5월까지 각장 87.8-140.0 mm 범위의 개체를 무작위로 선별하여 분석에 이용하였다. 노로바이러스 검출을 위해 연구 기간 동안 시료 특성 및 분석 목적에 따라 총 3가지의 분석 방법을 순차적으로 적용하였다. 방법 1 (2024년 7-9월) 은 HEO 양식장에서 생산된 참굴과 키조개를 대상으로 시료 pooling 기반 분석을 적용하였다. 방법 2 (2024년 10-12월) 는 개체 단위의 노로바이러스 검출 여부를 확인하기 위한 단계로서 non-pooling 방식으로 수행하였으며, HEO 시료와 함께 거제 양식 참굴 및 고창 자연산 참굴을 포함하여 비교 분석하였다. 방법 3 (2025년 1-11월) 은 다수의 시료 분석을 고려하여 pooling 기반 분석을 재적용하였다. 본 연구의 목적은 단계별 분석법의 성능을 상호 비교하는 데 있지 않고, 각 시기와 다른 해역에서 채집된 시료의 노로바이러스 검출 여부를 지속적으로 확인하는 데 있다. 따라서 단계별 시료 전처리 및 RNA 추출 절차에는 차이가 있었으나, 모든 단계에서 최종 노로바이러스 검출은 동일한 one-step RT-qPCR 체계를 이용하여 수행하였다. 시료의 종 구성과 채집 시기는 Table 1에, 분석 방법별 개요는 Table 2에 제시하였다.

### 2. 시료 채집 정점

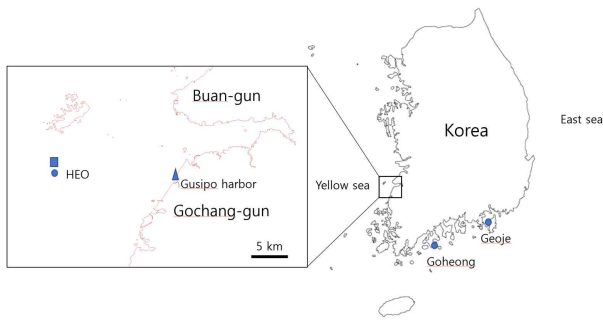
시험군 시료는 전라북도 고창군 구시포항 서쪽 약 15 km 에 위치한 고유속 개방해역 (HEO) 양식장에서 확보하였다 (Fig. 1). 방법 1에서는 HEO 환경에서 사육된 2배체 및 3배체 참굴과 키조개를 대상으로 스크리닝을 수행하였다. 방법 2에서는 HEO 시료에 더하여 연안 비교 해역 시료를 추가하였다. 비교 시료로는 고창 구시포 연안의 자연산 2배체 참굴과

**Table 1.** Species, ploidy status, number of samples, and collection periods of the bivalves used in this study (NS, not sampled)

Period	Pacific oysters					Penshell	Sample grouping	
	Diploid			Triploid		HEO		
	HEO	Gochang	Geoje	HEO	Goheng			
2024	Jul	NS	NS	NS	15	NS	21	Pooled (method 1)
	Aug	74	NS	NS	6	NS	16	
	Sep	70	NS	NS	17	NS	24	
	Oct	10	NS	4	NS	NS	NS	Individual (method 2)
	Nov	10	10	10	10	NS	10	
	Dec	10	10	10	10	NS	10	
2025	Jan	30	30	NS	30	NS	10	Pooled (method 3)
	Feb	30	30	30	NS	NS	16	
	Mar	30	30	30	NS	NS	10	
	Apr	30	30	30	NS	NS	24	
	May	30	30	30	NS	NS	20	
	Jun	30	30	30	NS	30	NS	
	Jul	NS	NS	NS	NS	NS	NS	
	Aug	NS	30	NS	30	30	NS	
	Sep	NS	NS	NS	30	30	NS	
	Oct	NS	NS	NS	42	NS	NS	
	Nov	NS	NS	NS	20	NS	NS	
Sum	354	230	174	210	90	140	1,198	

**Table 2.** RNA extraction methods and diagnostic kits used for the detection of norovirus in the samples in this study

Item	Method 1 (Jul-Sep 2024)	Method 2 (Oct-Dec 2024)	Method 3 (Jan-Nov 2025)
Sample processing	Pooling (3 g)	Non-pooling (individual)	Pooling (3 g)
Samples analyzed	HEO Pacific oysters, pen shells	HEO + Geoje farmed oysters + Gochang wild oysters	HEO diploid & triploid Pacific oysters, pen shells + Geoje farmed oysters + Gochang wild oysters
Pre-treatment	Proteinase K treatment (NIFS standard method)	None (digestive gland used directly)	Proteinase K treatment (NIFS standard method)
RNA extraction kit	Clear-S Total RNA Extraction Kit (InVIRUSTech)	easy-spin Total RNA Extraction Kit (iNtRON)	Viral Gene-spin Viral DNA/RNA Extraction Kit (iNtRON)
Extraction substrate	Proteinase K-treated digestive gland supernatant	Digestive gland tissue (direct)	Proteinase K-treated digestive gland supernatant
RT-qPCR method	One-step RT-qPCR (PowerChek™ Kit)	One-step RT-qPCR (PowerChek™ Kit)	One-step RT-qPCR (PowerChek™ Kit)



**Fig.1.** Sampling locations of Pacific oysters (*Crassostrea gigas*) and pen shells (*Atrina pectinata*) collected from four sites along the west and south coasts of Korea. Circles indicate cultured oyster populations, the triangle indicates a wild population, and the square indicates pen shells from HEO.

경상남도 거제 연안의 양식 2배체 참굴을 사용하였으며, 이를 통해 HEO 양식장 시료와 연안 생산 시료의 노로바이러스 검출 여부를 동일 시기에 비교하고자 하였다. 방법 3에서는 HEO 시료와 비교 해역 시료를 대상으로 장기 모니터링을 수행하였다. 시험군은 HEO 양식장에서 사육된 2배체 및 3배체 참굴과 키조개였으며, 비교 시료는 고창 구시포 연안의 자연산 2배체 참굴, 거제 연안의 양식 2배체 참굴, 그리고 고흥 연안의 양식 3배체 참굴로 구성하였다. 고흥 3배체 참굴은 HEO 양식장에 입식한 치패와 동일 집단에서 유래한 개체로, 동일 기원의 종자가 상이한 사육 해역에서 어떠한 노로바이러스 검출 양상을 보이는지 확인하기 위해 수행되었다. 채집된 모든 시료의 중, 배수성 및 채집 시기는 Table 2에 제시하였다.

### 3. 시료 전처리

채집 후 냉장 상태로 국립수산대학교 해양기생충학연구소로 운반하였다. 실험실에서 -80°C로 냉동된 시료는 개각 후 소화매양을 적출하였으며 방법 1과 3에서는 약 3g 씩 pooling 하였고, 방법 2에서는 개별 소화매양을 분석에 이용하였다.

### 4. RNA 추출

#### 1) 단계별 RNA 추출

방법 1에 사용된 시료는 전처리 완료 후, Clear-S Total RNA Extraction Kit (InVIRUSTech, Korea) 를 이용하여 RNA를 추출하였으며, 방법 2의 시료는 소화매양 조직으로부터 easy-spin Total RNA Extraction Kit (iNtRON, Korea) 를 사용하여 RNA를 추출하였다. 방법 3에 사용된 시료는 소화매양 마쇄 후 상등액으로부터 Viral Gene-spin Viral DNA/RNA Extraction Kit (iNtRON, Korea) 를 사용하여 RNA를 추출하였다. RNA 수율을 높이기 위해 binding 단계

의 원심분리를 5회 반복하였다.

#### 2) RNA 정량 및 보정

추출된 RNA는 BioTek Gen5 (Agilent/USA) 를 이용하여 농도와 순도를 측정하였다. 분석의 정확성을 높이기 위하여 RNase-free water를 사용하여 최종 농도를 100 ng/μl로 맞추고 RT-qPCR의 주형으로 사용하였다.

#### 3) RT-qPCR를 이용한 노로바이러스 검출

추출된 RNA에서 노로바이러스 GI 및 GII 유전형을 동시에 검출하기 위해 PowerChek™ Norovirus GI/GII Multiplex Real-time PCR Kit (Kogenebiotech, Korea) 를 사용하였다 (Lee *et al.*, 2025). 대조군은 키트에 포함된 대조액을 사용하였으며, 음성 대조군으로는 RNase-free water를 사용하였다. 반응액은 총 20 μl을 조제하였으며, 상세 조성은 primer/probe mix 4 μl, Real-time RT-PCR Premix 11 μl, 그리고 주형 RNA 또는 대조액 5 μl를 혼합하였다. 반응 조건은 먼저 50°C에서 30분간 역전사 (Reverse transcription) 를 수행하고, 95°C에서 10분간 초기 변성 (Initial denaturation) 을 거쳤다. 이후 95°C에서 15초 (Denaturation), 55°C에서 1분 (Annealing/Extension) 조건을 45회 반복하여 유전자를 증폭시켰다.

분석의 신뢰도를 확보하기 위하여 모든 시료는 3반복 분석하였으며, Ct값 ≤ 40 조건에서 2회 이상 유의미한 증폭 곡선이 확인된 경우를 최종 양성으로 판정하였다. 매 실험마다 키트 내 Cy5 채널 기반 내부 대조군 (IC) 의 정상 검출 여부를 확인하여 PCR 저해를 모니터링하였으며, IC가 검출되지 않은 시료는 분석에서 제외하였다.

## 결 과

**방법 1:** 2024년 7월부터 9월까지 수행된 분석 결과 HEO에서 채집된 2배체와 3배체 참굴 및 키조개 성패와 치패 모두 음성으로 확인되었다 (Table 3).

**방법 2:** 2024년 10월부터 같은 해 12월까지 수행된 2단계 실험에서 HEO의 2배체 및 3배체 참굴 (총 30개체), 거제산 양식 참굴 (총 24개체), 고창군 자연산 참굴 (총 20개체) 및 HEO 키조개 성패 (총 20 개체)에 대한 RT-qPCR 분석을 수행한 결과, 모든 개체에서 전 기간 음성으로 확인되었다 (Table 3).

**방법 3:** 2025년 1월부터 11월까지 고흥읍 개방해역 (HEO) 양식장에서 채집한 시료를 분석한 결과, 2배체 및 3배체 참굴과 키조개를 포함한 전 시료에서 노로바이러스가 검출된 개체는 확인되지 않았다. 반면, 비교군으로 조사한 일부 연안 해역 시료에서는 시기별로 노로바이러스 양성 반응이 확인되었다.

**Table 3.** Results of norovirus detection in bivalves during the study period (+, positive for norovirus; -, negative for norovirus, NS, not sampled)

Period	Pacific oysters					Penshell	
	Diploid			Triploid		HEO	
	HEO	Gochang	Geoje	HEO	Goheng		
2024	Jul	NS	NS	NS	-	NS	-
	Aug	-	NS	NS	-	NS	-
	Sep	-	NS	NS	-	NS	-
	Oct	-	NS	-	NS	NS	NS
	Nov	-	-	-	-	NS	-
	Dec	-	-	-	-	NS	-
2025	Jan	-	+	-	-	NS	-
	Feb	-	-	+	NS	NS	-
	Mar	-	-	+	NS	NS	-
	Apr	-	-	-	NS	NS	-
	May	-	-	-	NS	NS	-
	Jun	-	-	-	NS	-	NS
	Jul	NS	NS	NS	NS	NS	NS
	Aug	NS	-	NS	-	-	NS
	Sep	NS	NS	NS	-	-	NS
	Oct	NS	NS	NS	-	NS	NS
	Nov	NS	NS	NS	-	NS	NS

고창 자연산 2배체 참굴의 경우 1월 시료에서만 GI와 GII가 각각 양성으로 나타났으며, 이때 확인된 평균 유전자 증폭 (Ct) 값은 GI 38.45 ± 2.46, GII 32.37 ± 0.28이었다. 이후 2월부터 8월까지 고창에서 채집된 시료는 모두 음성으로 판정되었다. 거제에서 양식된 2배체 참굴에서는 2월과 3월 시료에서 GII 양성이 확인되었고, 해당 시기의 평균 Ct값은 각각 38.15 ± 0.1 및 35.35 ± 0.86으로 분석되었다. 그러나 4월부터 6월까지 거제에서 채집된 시료에서는 모두 음성으로 확인되었다. 한편, 고흥에서 양식된 3배체 참굴은 6월부터 9월까지 조사한 모든 시료에서 노로바이러스가 검출되지 않아 전 기간 음성으로 확인되었다. 전체적으로 볼 때, HEO 양식장 시료에서는 조사 전 기간 동안 노로바이러스가 검출되지 않은 반면, 일부 대조 해역의 참굴에서는 특정 시기에 한하여 일시적인 양성 반응이 나타나는 양상을 보였다.

매 실험마다 운용한 양성 대조군 (Positive Control) 및 내부 대조군 (Internal Control, IC) 모두 정상적으로 확인되어 분석 과정의 기술적 유효성을 입증하였다.

### 고찰

본 연구는 육상 기원 오염원으로부터 상대적으로 격리된 고

유속 개방해역 (HEO) 양식환경에서 생산된 패류의 노로바이러스 검출 여부를 시계열적으로 평가하고, 이를 연안 비교 해역의 패류 시료와 함께 분석함으로써 HEO 양식환경의 위생학적 특성을 검토하고자 수행되었다. 2024년 7월부터 2025년 11월까지 실시한 RT-qPCR 분석 결과, HEO 양식장에서 사육된 2배체 및 3배체 참굴과 키조개에서는 조사 기간 전체에 걸쳐 노로바이러스 GI 및 GII가 검출되지 않았다. 반면, 비교 해역 시료 중 고창 연안의 자연산 2배체 참굴에서는 2025년 1월에 GI와 GII가 검출되었고, 거제 연안의 양식 2배체 참굴에서는 2025년 2월과 3월에 GII가 검출되었다. 또한 고흥에서 양식된 3배체 참굴은 조사 기간 동안 모두 음성으로 확인되었다. 이러한 결과는 고창군 연안의 자연산 참굴 (2025년 1월 양성) 과 거제 양식 참굴 (2025년 2-3월 양성) 에서 바이러스가 검출된 것과 뚜렷한 대조를 보였다. 특히 고창 연안 시료의 양성 반응은 HEO 시료의 비검출 해석에 중요한 의미를 갖는다. 즉, 본 조사에서 노로바이러스 오염 위험이 완전히 부재했던 것이 아니라 특정 해역의 시료에서는 실제로 검출이 이루어진 반면, HEO 시료에서는 검출되지 않았다는 점에서 본 연구에서 사용한 분석 방법과 검출 체계가 적절히 작동하였음을 시사한다.

패류의 노로바이러스 오염은 일반적으로 하수처리장 방류

수, 정화조 유출수, 강우 후 육상 유출수 등 인간 분변에 기원한 오염원의 연안 유입과 밀접한 관련이 있다 (Mathijs *et al.*, 2012; Winterbourn *et al.*, 2016). 국내의 선행연구에서는 연안 및 반폐쇄성 해역에서 생산된 패류에서 노로바이러스가 반복적으로 검출되어 왔으며, 특히 겨울철과 초봄에 검출률이 증가하는 계절적 경향이 보고된 바 있다 (Shin *et al.*, 2014; Seo *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2021; Pu *et al.*, 2018; Mesquita *et al.*, 2011). 본 연구에서 고창 자연산 참굴이 1월에 양성을 보이고, 거제 양식 참굴이 2월과 3월에 양성을 보인 결과 역시 이러한 계절적 고위험 시기와 잘 부합한다. 반면 HEO 시료는 동일한 겨울철 조사 구간을 포함한 전 기간 동안 일관되게 비검출 상태를 유지하였다. 이는 HEO 양식환경이 연안 해역에 비해 노로바이러스 오염 위험이 상대적으로 낮을 가능성을 의미한다.

이러한 차이는 HEO 양식장의 입지적 및 수리학적 특성과 관련이 있을 가능성이 크다. 본 연구 대상 HEO 양식장은 고창 구시포 연안으로부터 약 15 km 떨어진 외해에 위치하고 있어 육상 기원 오염원이 직접적으로 유입될 가능성이 상대적으로 낮다. 또한 고유속 개방해역은 조류 소통이 원활하고 해수 교환이 활발하여, 연안에서 유입된 오염물질이 체류하거나 국지적으로 농축될 가능성이 연안 또는 반폐쇄성 해역보다 낮을 것으로 예상된다 (Campos *et al.*, 2015; McLeod *et al.*, 2017; Battistini *et al.*, 2021). 따라서 HEO 환경에서 노로바이러스가 검출되지 않은 것은 육상 오염원으로부터의 물리적 거리와 높은 해수 교환성이 함께 작용한 결과일 것으로 판단된다.

본 연구의 또 다른 의의는 2배체 참굴뿐 아니라 3배체 참굴과 키조개까지 포함하여 HEO 환경에서의 노로바이러스 검출 여부를 평가하였다는 점이다. 일반적으로 패류의 노로바이러스 축적은 여과섭식 특성 및 소화맹낭 내 결합 특성과 관련이 있는 것으로 알려져 있으며 (Le Guyader *et al.*, 2006; Le Guyader *et al.*, 2012), 생리적 특성이나 숙주 차이에 따라 검출 양상이 달라질 가능성이 있다. 그럼에도 불구하고 본 연구에서는 HEO에서 조사한 2배체 및 3배체 참굴, 키조개 모두에서 전 기간 비검출 결과가 확인되었다. 또한 고흥에서 양식된 3배체 굴 역시 조사 기간 동안 비검출로 나타났는데, 이들 개체가 HEO 양식장에 입식한 치패와 동일 집단에서 유래하였다는 점을 고려하면, 적어도 본 연구 범위 내에서는 종차 기원 자체보다 사육 환경의 차이가 노로바이러스 검출 여부에 더 큰 영향을 줄 가능성이 있다. 다만 고흥 3배체 굴의 조사 시기가 고수온기였고 시료 수가 제한적이므로 이에 대한 해석은 보조적 수준으로 이해 하는 것이 타당할 것으로 여겨진다.

본 연구에서 키조개가 포함된 것은 생태적 의미뿐 아니라 기술적 측면에서도 중요하다. 키조개는 참굴과 동일한 여과섭

식성 이매패류로서 주변 해수에 존재하는 노로바이러스에 노출될 가능성이 있으므로, HEO 환경에서의 위생학적 안전성을 평가하는 대상으로 적절하다. 동시에 키조개는 소화맹낭이 체외로 돌출된 해부학적 특성을 가짐으로써 참굴보다 상대적으로 적출이 용이하다는 특성을 가지므로, 향후 대규모 노로바이러스 모니터링 기술 개발 측면에서도 실용적 가치가 있다. 즉, 본 연구에서 키조개를 포함한 것은 조사 대상종의 범위를 확장하기 위한 목적뿐 아니라, 외해 양식 패류를 대상으로 한 실용적 바이러스 감시체계 구축 가능성을 탐색하기 위한 의미도 가진다. 다만 본 연구는 키조개를 참굴의 직접적 대체종으로 검증하기 위해 설계된 것은 아니므로 이 부분은 향후 추가적인 연구가 필요하다.

본 연구 결과는 패류 위생 관리에서 바이러스 모니터링의 중요성을 보여준다. 노로바이러스는 대장균과 같은 세균성 위생 지표와 항상 일치하지는 않아 세균학적 기준을 충족하는 해역에서도 바이러스 오염은 발생할 수 있다 (Campos *et al.*, 2015). 또한 노로바이러스는 패류의 소화맹낭에 특이적으로 결합하고 생물 농축될 수 있으며 (Le Guyader *et al.*, 2006; Le Guyader *et al.*, 2012), 일단 축적된 뒤에는 정화에 의해 완전히 제거되지 않을 수 있다 (McLeod *et al.*, 2017; Battistini *et al.*, 2021). 따라서 패류의 위생 안전성을 확보하기 위해서는 수확 후 정화 중심의 사후 관리보다, 애초에 바이러스 유입 위험이 낮은 생산 환경을 확보하는 예방적 접근이 더욱 중요하다. 이러한 관점에서 HEO와 같은 외해 양식환경은 생산 공간의 확장 뿐 아니라, 패류 위생 안전성 측면에서도 의미 있는 대안이 될 수 있다. 특히 국내 하수처리장 등의 노로바이러스 검출이 빈번하고 (JIHE, 2026) 노로바이러스 검출에 따른 수출 제한과 같은 경제적 리스크에 노출되어 있다는 점을 고려하면 (FDA, 2025; Dimsum Daily, 2026), 본 연구는 해안선에서 멀리 떨어진 개방해역에서의 양식 패류의 위생 안전성 확보 가능성을 제시하는 기초자료로서 가치가 있다.

그럼에도 불구하고 본 연구에는 몇 가지 한계가 존재한다. 첫째, 본 연구는 예비 스크리닝, 개체 단위 확인, 장기 모니터링의 세 단계로 수행되었으며, 단계별로 시료 전처리 방식, 추출 기질, RNA 추출 키트가 상이하였다. 따라서 본 자료는 단계 간 진단 민감도 또는 정량적 검출 수준을 직접 비교하기 위한 자료라기보다, 각 시기와 해역에서 채집된 시료의 노로바이러스 검출 여부를 확인하기 위한 감시 자료로 해석하는 것이 타당하다. 둘째, 방법 1과 방법 3에서는 pooling 분석이 적용되었으므로, 극저농도의 바이러스가 일부 개체에만 존재한 경우 희석 효과에 의해 검출되지 않았을 가능성을 완전히 배제할 수는 없다. 셋째, 비교 해역 시료는 HEO와 완전히 대칭적인 월별 설계로 채집된 것이 아니기 때문에, 본 연구 결과

를 해석 간 정확한 유병률 차이로 해석하는 데에는 제한이 있다. 다만 본 연구에서는 모든 단계에서 동일한 one-step RT-qPCR 체계를 적용하였고, 매 실험마다 양성 대조군과 내부 대조군이 정상적으로 확인되었다. 또한 HEO 시료는 전 조사 기간 동안 일관되게 비검출을 유지한 반면, 일부 연안 비교 시료에서는 특정 계절에 실제 양성이 확인되었다는 점에서 본 결과가 해석별 노로바이러스 분포 현황을 설명하는데 적절하다고 판단된다.

종합하면, 본 연구는 서해안 HEO 양식장에서 생산된 2배체 및 3배체 참굴과 키조개 시료에서 17개월의 조사 기간 동안 노로바이러스가 검출되지 않았음을 보여주었으며, 이는 겨울철과 초봄에 일부 연안 비교 해석의 굴 시료에서 양성이 확인된 결과와 뚜렷한 대조를 이룬다. 이러한 결과는 HEO 양식 환경이 육상 기원 노로바이러스 오염에 대해 상대적으로 낮은 위험을 갖고 있을 가능성을 시사하며, 개방 해역에서의 패류 양식의 장점을 나타내는 자료로서 유용한 근거가 될 수 있다. 향후 패류 시료에 대한 감시 뿐 아니라 해수, 부유입자, 강우, 유속, 수온 등 환경 자료를 함께 연계한 장기 모니터링과 표준화된 단일 분석 체계 기반의 후속 연구가 수행된다면, HEO 환경의 위생학적 장점과 그 작동 기전을 보다 정밀하게 규명할 수 있을 것으로 기대된다.

## 사 사

본 연구는 해양수산과학기술진흥원 (KIMST) (과제번호: RS-2022-KS221679) 및 국립수산물품질관리원 “수출패류 생산해역 및 수산물 위생조사 사업 (R2026055)” 의 지원을 받아 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Baker, K., Morris, J., McCarthy, N., Saldana, L., Lowther, J., Collinson, A., Young, M. (2011) An outbreak of norovirus infection linked to oyster consumption at a UK restaurant, February 2010. *Journal of Public Health*, **33**: 205-211.
- Battistini, R., Listorti, V., Squadrone, S., Pederiva, S., Abete, M.C., Mua, R., Ciccotelli, V., Suffredini, E., Maurella, C., Baioni, E., Orlandi, M., Ercolini, C., Serracca, L. (2021) Occurrence and persistence of enteric viruses, arsenic and biotoxins in Pacific oysters farmed in an Italian production site. *Marine Pollution Bulletin*, **162**: 111843.
- Battistini, R., Masotti, C., Listorti, V., Suffredini, E., Maurella, C., Garcia-Vozmediano, A., Costa, E., Iacona, F., Orlandi, M., Ercolini, C. (2021) Norovirus Persistence in Oysters to Prolonged Commercial Purification. *Pathogens*, **10**: 944.
- Burkhardt, W., Calci, K.R. (2000). Selective accumulation may account for shellfish-associated viral illness. *Applied and Environmental Microbiology*, **66**: 1375-1378.
- Campos, C.J.A., Avanshjt, J., Gustar, N., Lowther, J., Powell, A., Stockley, L., Lees, D.N. (2015) Fate of human noroviruses in shellfish and water impacted by frequent sewage pollution events. *Environmental Science & Technology*, **49**: 8377-8385.
- Chhabra, P., de Graaf, M., Parra, G.I., Chan, M.C-W., Green, K., Martella, V., Wang, Q., White, P.A., Katayama, K., Vennema, H., Koopmans, M.P.G., Vinjé, J. (2019). Updated classification of norovirus genogroups and genotypes. *Journal of General Virology*, **100**: 1393-1406.
- Dimsum Daily (2026) South Korean raw oysters and soy sauce crab under scrutiny following Hong Kong norovirus outbreak. <https://www.dimsumdaily.hk/south-korean-raw-oysters-and-soy-sauce-crab-under-scrutiny-following-hong-kong-norovirus-outbreak/> (Access date 2026.03.11.)
- FDA (2025) FDA Advises Restaurants and Retailers Not to Serve or Sell and Consumers Not to Eat Certain Frozen Half-Shell Oysters from Republic of Korea Designated Area II, Potentially Contaminated with Norovirus. <https://www.fda.gov/food/alerts-advisories-safety-information/fda-advises-restaurants-and-retailers-not-serve-or-sell-and-consumers-not-eat-certain-frozen-half> (Access date 2026.03.11.)
- Glass, R.I., Parashar, U.D., Estes, M.K. (2009) Norovirus gastroenteritis. *New England Journal of Medicine*, **361**: 1776-1785.
- Jibowu, M., Driesse, K., May, S., Wright, A., Swate, T., Cotter, C. (2023) Notes from the Field: Outbreak of Norovirus Illness Caused by Consumption of Oysters Harvested from Galveston Bay, Texas — November–December 2022. *MMWR Morbidity and Mortality Weekly Report*, **72**: 968-969.
- JIHE (2026) Weekly Analytical Trends of Wastewater-Based Infectious Disease Surveillance in 2026 (5th week). Jeollanam-do Institute of Health and Environment. <https://jihe.go.kr/main/na/ntt/selectNttList.do?mi=9157&bbsId=17> (Access date 2026.03.11.)
- Kim, SR. (2013) The Bivalves and Norovirus. *Safe Food*, **8**: 1.
- Kim, M.S., Koo, E.S., Choi, Y.S., Kim, J.Y., Yoo, C.H., Yoon, H.J., Kim, T.-O., Choi, H.B., Kim, J.H., Choi, J.D., Park, K.-S., Shin, Y.S., Kim, Y.-M., Ko, G.P., Jeong, Y.S. (2016). Distribution of Human Norovirus in the Coastal Waters of South Korea. *PLoS One*, **11**: e0163800.
- Le Guyader, F.S., Loisy, F., Atmar, R.L., Hutson, A.M., Estes, M.K., Ruvoën-Clouet, N., Pommepuy, M., Le Pendu, J. (2006) Norwalk virus-specific binding to oyster digestive tissues. *Emerging Infectious Diseases*, **12**: 931-936.
- Le Guyader, F.S., Atmar, R.L., Le Pendu, J. (2012) Transmission of viruses through shellfish: when specific ligands come into play. *Current Opinion in*

- Virology*, **2**: 103-110.
- Lee, M., Cho, S.R., Jo, Y., Lee, D.Y., Han, M.G., Park, S.W. (2025) Trends in Norovirus Genotypes in South Korea, 2019-2024: Insights from Nationwide Dual Typing Surveillance. *Viruses*, **17**: 1572.
- Mathijs, E., Stals, A., Baert, L., Coetzee, N., Botteldoorn, N., Denayer, S., Postelmans, G., Uyttendaele M., Thiry, E. (2012) A Review of Known and Hypothetical Transmission Routes for Noroviruses. *Food and Environmental Virology*, **4**: 131-152.
- McLeod, C., Polo, D., Le Saux, J.C., Le Guyader, F.S. (2017). Depuration and relaying: a review on potential removal of norovirus from oysters. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, **16**: 692-706.
- Mesquita, J.R., Vaz, L., Cerqueira, S., Castilho, F., Santos, R., Monteiro, S., Manso, C.F., Romalde, J.L., Nascimento, M.S.J. (2011) Norovirus, hepatitis A virus and enterovirus presence in shellfish from high quality harvesting areas in Portugal. *Food Microbiology*, **28**: 936-941.
- Patel, M.M., Hall, A.J., Vinjé, J., Parashar, U.D. (2009) Noroviruses: a comprehensive review. *Journal of Clinical Virology*, **44**: 1-8.
- Pu, J., Miura, T., Kazama, S., Konta, Y., Azraini, N.D., Ito, E., Ito, H., Omura, T., Watanabe, T. (2018) Weekly variations in norovirus genogroup II genotypes in Japanese oysters. *International Journal of Food Microbiology*, **284**: 48-55.
- Seo, D.J., Lee, M.H., Son, N.R., Seo, S.W., Lee, K.B., Wang, X., Choi, C.S. (2014) Seasonal and regional prevalence of norovirus, hepatitis A virus, hepatitis E virus, and rotavirus in shellfish harvested from South Korea. *Food Control*, **41**: 178-184.
- Shin, S.B., Oh, E.-G., Lee, H.-J., Kim, Y.K., Lee, T.S., Kim, J.-H. (2014) Norovirus Quantification in Oysters *Crassostrea gigas* Collected from Tongyeong, Korea. *Korea Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **47**: 501-507.
- U.S. Food and Drug Administration (FDA) (2024). FDA advises restaurants and retailers not to serve or sell certain frozen half-shell oysters from Republic of Korea due to norovirus contamination. FDA Safety Alert. <https://www.fda.gov>.
- Winterbourn, J.B., Clements, K., Lowther, J.A., Malham, S.K., McDonald, J.E., Jones, D.L. (2016) Use of *Mytilus edulis* biosentinels to investigate spatial patterns of norovirus and faecal indicator organism contamination around coastal sewage discharges. *Water Research*, **105**: 241-250.
- Zhang, H., Liu, D., Zhang, Z., Hewitt, J., Li, X., Hou, P., Wang, D., Wu, Q., Wu, Q. (2021) Surveillance of human norovirus in oysters collected from production area in Shandong Province, China during 2017-2018. *Food Control*, **121**: 107649.
- Zheng, D.P., Ando, T., Fankhauser, R.L., Beard, R.S., Glass, R.I., Monroe, S.S. (2006) Norovirus classification and proposed strain nomenclature. *Virology*, **346**: 312-323.