KFAS 한국수산과학회지 Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences
한수지 59(5), 513-522, 2026

Original Article
Korean J Fish Aquat Sci 59(5),513-522,2026

서해안 중부 바지락(*Ruditapes philippinarum*) 생산해역의 위생지표세균 및 중금속 오염도 분석

정상현 · 이현경 · 윤민철 · 이윤미[1] · 조미라[2] · 이가정 · 하광수 · 박권삼[3] · 이병호[4] · 신순범*

국립수산과학원 식품안전가공과, [1]국립수산과학원 연구협력과, [2]국립수산과학원 남동해수산연구소, [3]국립군산대학교 식품생명공학과, [4]세종대학교 식품생명공학과

Analysis of Sanitary Indicator Bacteria and Heavy Metal Contamination in Short-necked Clam (*Ruditapes philippinarum*) Growing Areas

Sang Hyeon Jeong, Hyun Kyeong Lee, Minchul Yoon, Yoonmi Lee[1], Mi Ra Jo[2], Ka Jeong Lee, Kwang Soo Ha, Kwon Sam Park[3], Byung-Hoo Lee[4] and Soon Bum Shin

Food Safety and Processing Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Republic of Korea
[1]Research Cooperation Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Republic of Korea
[2]Southeast Sea Fisheries Research Institute, National Institute of Fisheries Science, Tongyeong 53085, Republic of Korea
[3]Department of Food Science and Biotechnology, Kunsan National University, Gunsan 54150, Republic of Korea
[4]Department of Food Science and Biotechnology, Sejong University, Seoul 05006, Republic of Korea

This study aimed to evaluate the sanitary condition of short-necked clam (*Ruditapes philippinarum*) growing areas on the central west coast of Korea from January 2023 to December 2025. The seawater quality at all 15 stations located on major short-necked clam beds met the Korean criteria for designated areas. However, the bacteriological quality of short-necked clams varied widely among stations; under the European Union (EU) regulation, only four stations were classified as Class A, and the remaining 11 were classified as Class B. These findings contrast with the favorable sanitary conditions observed in the seawater. The results also indicate that areas with chronic mild contamination (*Escherichia coli* exceeding 230 most probable number (MPN)/100 g) and those with extreme contamination (*E. coli* exceeding 700 MPN/100 g) require distinct shellfish depuration and sanitary management strategies. Heavy metal concentrations in short-necked clams at all stations were well below the EU regulatory limits; however, the accumulation trend observed at specific stations (S18 and C17) has important implications for proactive management.

Keywords: Classification, Food safety, Sanitary survey, Shellfish growing area, Short-necked clam

서 론

바지락(*Ruditapes philippinarum*)은 우리나라 서해안 연안 어업 및 해면 양식업에서 높은 생산량(총 21,510톤, 2025년)과 경제적 가치를 갖고 있는 대표적인 패류 자원이다(Statistics Korea, 2025). 바지락은 영양가가 높고 감칠맛이 뛰어나며, 대중적인 먹거리로서 국민 다소비 패류 품종 중 상위에 지속적으로 위치하고 있다(MOF, 2024). 그러나 바지락이 주로 서식하는 서해안 연안 해역은 지형적으로 수심이 얕고 조석 간만의 차가 크며, 대규모 하천수의 유입과 함께 배수유역에 위치한 산업단지, 도시화, 농·축산 활동 등 다양한 인위적 오염원에 상시 노출되어 있다는 취약성을 보이고 있다. 특히 바지락을 포함한 이매패류(bivalve mollusks)는 정착성 저서생물로서, 별도의 이동 능력이 없이 해수 또는 퇴적물 중의 유기물과 미세 입자를 아가미로 여과섭식(filter feeding)하는 생리적 특성을 지니고 있다. 이 과정에서 해수 및 저질 중에 부유하는 병원성 미생물과 화학적 유해 물질을 체내 조직에 고농도로 농축시키는 경향이 강하기 때문에 오염된 해역에서 생산된 패류를 생식하거나 충분

***Corresponding author:** Tel: +82. 51. 720. 2620 Fax: +82. 51. 720. 2619
E-mail address: ssb0716@korea.kr

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

https://doi.org/10.5657/KFAS.2026.0513
Korean J Fish Aquat Sci 59(5), 513-522, October 2026
Received 29 August 2026; **Revised** 4 October 2026; **Accepted** 5 October 2026
저자 직위: 정상현(연구사), 이현경(연구사), 윤민철(연구사), 이윤미(연구사), 조미라(연구관), 이가정(연구관), 하광수(과장), 박권삼(교수), 이병호(교수), 신순범(연구관)

Copyright © 2026 The Korean Society of Fisheries and Aquatic Science

pISSN:0374-8111, eISSN:2287-8815

히 가열하지 않고 섭취할 경우 급성 위장염 등의 수인성 감염병이나 만성 중금속 중독을 유발할 수 있어 대내외적인 식품안전성 확보가 무엇보다 필요한 실정이다(Lee et al., 2006; Kim et al., 2025b).

이러한 패류의 위생학적 취약성 때문에 국내외 위생관리 당국에서는 수산물의 세균학적 오염 유무를 확인하는 대표적인 위생지표세균(sanitary indicator bacteria)으로 분변계대장균(fecal coliform)과 대장균(*Escherichia coli*)을 상시 모니터링하고 있다. 나아가 한국산 패류의 주요 수출 대상국인 미국의 식품의약국(Food and Drug Administration)에서 운영 중인 국가패류위생계획(National Shellfish Sanitation Program)과 유럽연합(European Union, EU)의 식품위생 규정(Commission Implementing Regulation (EU) 2019/627)은 생산해역을 세균학적 오염도에 따라 지정(designated) 또는 등급화(classification)하여 관리하고 있으며, 관리기준에 따라 생식용 패류로 유통이 가능하거나 채취 금지 또는 인공정화(depuration) 및 자연정화(relaying)를 통한 안전성 확보를 의무화하고 있다(European Commission, 2019; US FDA, 2023). 서해안의 경우, 특히 여름철 집중호우 및 태풍으로 인한 대규모 담수 유입 시 육상 기원의 분변 오염물질이 연안으로 단시간에 다량 유입되며, 이로 인해 대장균 등 분변 오염 지표의 농도가 수십에서 수백 배까지 급격히 상승하는 '가변적 오염(pulsed contamination)' 특성을 보인다(Lee et al., 2024; Kim et al., 2025a). 이처럼 환경 요인에 따른 변동성이 매우 크기 때문에, 단발성이거나 단기간의 조사로는 해역의 실질적인 위생학적 안전성을 대표하기 어려우며, 최소 3년 동안 30회(패류 주 생산시기 월 1회 수준) 이상의 시료 채취(systematic random sampling)와 장기적이고 연속적인 모니터링 체계가 필수적으로 요구된다.

또한 최근 국내에서 수행된 패류의 중금속 오염도 관련 연구들에 따르면, 우리나라 연안 전반에서 검출되는 카드뮴(Cd), 납(Pb), 수은(Hg) 등의 중금속 농도는 대체로 국내 및 국제(EU 등) 허용 기준을 하회하는 안전한 수준을 유지하고 있는 것으로 보고되고 있다(Lee et al., 2022). 그러나 서해안은 인접한 산업단지로부터의 폐수 유입, 대규모 간척 사업, 그리고 하천을 통한 육상 오염물질의 지속적인 유입으로 인해 중금속 오염원에 상시 노출되어 있다는 취약성을 안고 있다(Ahn et al., 2006; Kim et al., 2009). 일부 산업적 영향을 강하게 받는 폐쇄성 내만이나 특정 하구역 퇴적물 인근의 패류에서는 아연(Zn), 구리(Cu)와 같은 필수 금속의 국지적 농축 현상이나, 계절적 요인(용존산소 저하, 수온 상승 등) 및 강우에 의한 육상 기원 물질 유입 증가에 따라 중금속 농도가 일시적으로 상승하는 경향이 관찰되고 있다(Gavrilovic et al., 2007; Nguyen Thanh Kim et al., 2025).

이러한 패류의 특성으로 인해 수산물 안전관리 강화에 대한 지속적인 사회적 요구와 수출 규격 기준이 점차 엄격해짐에 따라, 단편적인 조사를 넘어 서해안 연안 전반에 대한 체계적인 시공간적 모니터링 데이터의 확보가 절실히 요구된다.

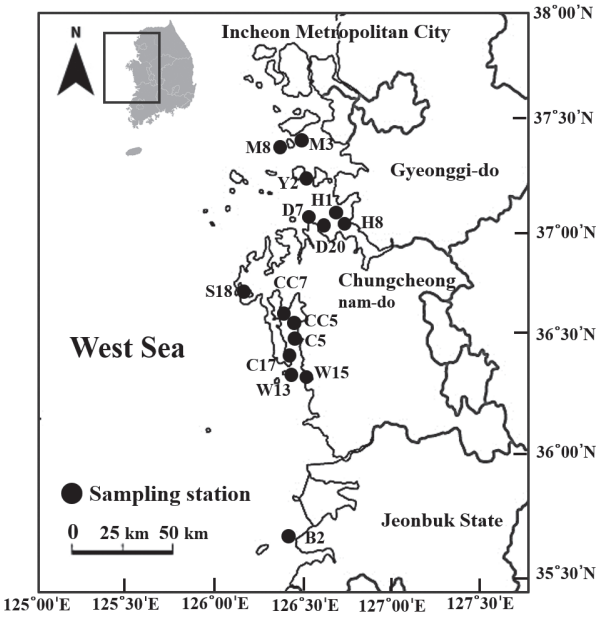


Fig. 1. Sampling locations of short-necked clam (*Ruditapes philippinarum*) in the production areas.

따라서 본 연구는 산업화·도시화가 집중된 수도권 지역, 새만금 산업단지 및 반폐쇄성 내만(충청남도 권역)이 다수 위치한 서해안 중부 연안의 주요 바지락 양식장 및 채취 어장을 대상으로 위생지표세균 검출 및 중금속 함량 수준을 최근 3년간 종합적으로 모니터링하고 분석하였다. 서해안 중부의 지역별 환경적 특성과 시기별 변화가 바지락 체내의 농도에 미치는 영향을 구명하고, 검출된 농도를 국내외 식품 안전 기준치와 비교하여 안전성 수준을 객관적으로 평가하고자 한다. 본 연구의 결과는 서해안 갯벌 바지락의 위생·안전성 확보를 위한 과학적 기초 자료로 활용할 수 있을 뿐만 아니라, 향후 연안 어장의 오염원 관리 및 지속 가능한 패류 양식 산업을 위한 정책적 가이드라인을 수립하는 데 중요한 기여를 할 것으로 기대된다.

재료 및 방법

시료 채취 및 전처리

서해안 중부에서 생산되는 바지락의 위해요소 모니터링을 위해 2023년부터 2025년에 걸쳐 총 15개 조사정점으로부터 해수와 바지락을 채취하여 분석에 사용하였다(Fig. 1). 15개 조사정점은 해양수산부 또는 관할 지자체에서 위생학적 평가를 요청한 바지락 양식장 또는 어장을 대상으로 선정하였다. 해수 및 패류는 3년간 연 10회[바지락 생산해역 상황(자연재해, 어장환경 등)에 따라 월 1회 조사]씩 채취하여 생물학적 위해요소(위생지표세균)를 분석하고, 조사정점별 최소 연 1회(9월) 이화학적 위해요소(중금속) 분석을 실시하였다. 일부 조사정점에서는

하절기 고수온 및 환경 스트레스로 인한 대량 폐사가 발생(M3, M8, H1, H8)했거나, 조사정점 어장에 대체 패류 품종이 생산(D7, D20)되어 계획된 정량의 시료를 채취하지 못하였다. 해수 및 바지락 시료는 무균처리된 용기에 담아 아이스박스를 이용하여 저온상태(10°C 이하)로 실험실까지 운반하였으며, 미생물 분석은 채취 후 12시간 이내에 실시하였다.

바지락 중금속 분석을 위해 채취한 시료를 3차 증류수로 3회 이상 및 2% (vol/vol) 질산(Suprapur 65%; Merck KGaA, Darmstadt, Germany)으로 1회 세척하여 이물질을 제거한 후, 동결건조기(FDU-2100; Tokyo Rikakikai Co., Ltd., Tokyo, Japan) 조건을 진공도 10 Pa 이하 및 온도 -60°C 이하로 설정하여 최소 3일 이상 동결건조하였다. 동결건조된 시료는 동결건조 중 변화한 수분함량을 측정한 후 즉시 분쇄하여 분석 시료로 사용하였다.

미생물 분석 및 평가

해수 및 패류에 대한 분변계대장균(fecal coliform) 및 일반세균수(standard plate count) 분석은 Recommended Procedures for the Examination of Sea Water and Shellfish (APHA, 1970)에 준하여 분석하였다. 또한, 패류에 대한 국제적 수준(EU)의 위생기준에 부합 여부를 확인하기 위해 대장균(*E. coli*) 분석은 Most probable number technique using 5-bromo-4-chloro-3-indolyl-β-D-glucuronide (ISO 16649-3:2015)에 따라 분석하였으며, 해수 및 패류에 대한 분석항목에 사용된 배지 및 배양조건은 Shin et al. (2022)를 참고하였다. 그리고 해역에 대한 위생학적 평가를 위해 각 조사정점에 대한 3년간 결과값을 기하평균(geometric mean, GM; GM=Antilog[X_{log}], X_{log}=각 자료 그룹에서의 각각의 최확수(most probable number, MPN)의 대수값의 평균) 및 estimated 90th percentile (90th percentile; 90th percentile=Antilog[1.28 × S_{log}+X_{log}], S_{log}=각 자료 그룹에서의 각각의 MPN의 대수값의 표준편차, X_{log}=각 자료 그룹에서의 각각의 MPN의 대수값의 평균)로 계산하여 평가하였다 (US FDA, 2023). 또한 바지락 생산해역의 위생학적 등급을 판정하기 위해 해수는 미국의 국가패류위생계획 규정과 해양수산부 고시에 따라 평가하였고, 패류는 EU의 식품위생 규정에 따라 평가하여 해역별 위생 등급을 분류하였다(European Commission, 2019; MOF, 2023; US FDA, 2023).

중금속 분석 및 평가

중금속 8종(카드뮴, 납, 비소, 크롬, 구리, 니켈, 아연, 은) 분석을 위해 식품공전(MFDS, 2023) 방법을 참조하였으며, 동결건조된 시료 0.5 g을 시험관(Ø 16 mm × 125 mm)에 넣고 65% 질산 5 mL를 가한 후, 마이크로웨이브 분해 시스템(ultraWAVE; Milestone Srl, Sorisole, Italy)을 사용하여 120°C에서 120 bar로 12분, 230°C에서 150 bar로 15분, 그리고 230°C에서 150 bar로 10분간 단계적으로 조건을 설정하여 분해하였다. 분해된 시료는 2% (vol/vol) 질산을 가하여 50 mL로 정용하고, 0.45 μm 필터(polyvinylidene fluoride membrane; Merck KGaA)로 여과하여 불순물을 제거한 후 유도결합플라즈마 질량분석기(820-MS; Bruker Daltonics GmbH & Co. KG, Bremen, Germany)로 각 시료당 3회 반복 분석하였다. 검량선(calibration curve)에 사용된 표준용액(multi-element calibration standards)은 100 μg/L stock 용액을 제조한 후 0, 5, 10, 25, 50 μg/L로 희석하여 정량분석에 사용하였다.

총수은 분석을 위해 동결건조 시료 0.1 g을 300°C에서 70초 건조, 800°C에서 250초 분해, 그리고 600°C에서 30초 동안 아말감화(amalgamation) 조건을 자동수은분석기(Hydra II; Teledyne Leeman Labs, Hudson, NH, USA)에 설정한 후, 각 시료당 3회 반복 분석하였다. 모든 시료는 공시료(blanks), 표준용액(standard solution), 그리고 인증표준물질(certified reference materials, CRM)로 DORM-4 (fish protein; National Research Council Canada, Ottawa, ON, Canada)와 SRM 1566b (oyster tissue; National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA)와 함께 분석되었으며, 모든 분석 결과는 수분감량법을 활용하여 수분 보정을 통해 습중량 기준(mg/kg, wet weight)으로 환산하였다.

분석법의 유효성 검토(method validation)를 위해, 방법검출한계(method detection limit, MDL), 정량한계(limit of quantification, LOQ), 회수율(recovery), 정확성(accuracy), 그리고 정밀성(precision)을 확인하였다(US EPA, 1995; AOAC, 2023). MDL과 LOQ는 저농도(1 μg/kg) 표준용액을 7회 반복 측정한 값을 이용해 계산하였다. 그리고 직선성(linearity)은 공시료를 포함한 5개 농도별 표준용액의 검량선을 통해 확인하였다. 패류 중금속 분석의 회수율, 정확성 그리고 정밀성 확인을 위해 CRM 1566b와 DORM-4를 사용하였으며, 7회 반복 분석한 결과로 계산하였다.

통계분석

모든 통계적 분석은 R 프로그램(ver. 3.6.1; R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria) 환경에서 95% 신뢰수준으로 분석하였다. 바지락 조사정점별 중금속 함량 간의 유의한 차이를 확인하기 위해, agricolae package를 이용해 one-way ANOVA를 수행하였으며 사후검정은 Duncan's multiple range test를 수행하였다. 바지락 조사정점 간 미생물 오염도 및 중금속 함량의 상관성 확인을 위해, vegan package의 rda (redundancy analysis) 함수를 이용하여 다변량 통계 분석(multivariate statistical analysis)의 주성분분석(principal component analysis, PCA)을 수행하였다.

결과 및 고찰

세균학적 안전성 평가

2023년 1월부터 2025년 12월까지 서해안 중부의 바지락 생

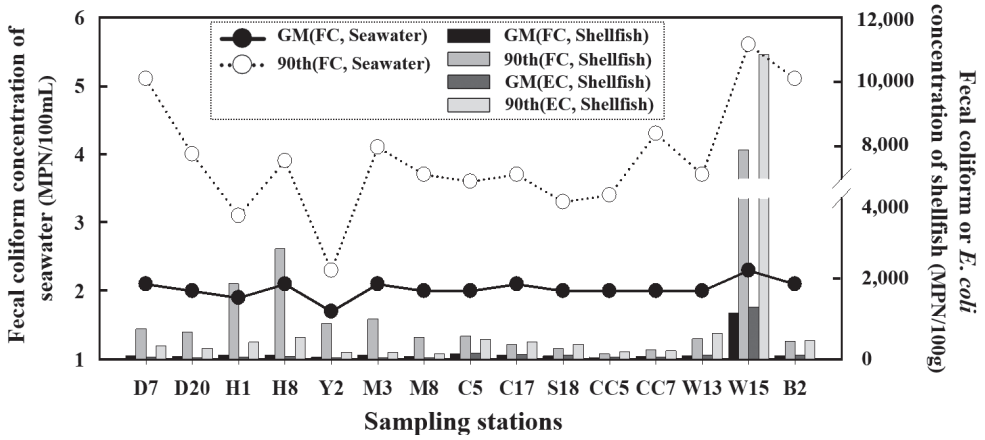


Fig. 2. Microbial contamination levels in seawater and short-necked clam (*Ruditapes philippinarum*) from January 2023 to December 2025 (GM, Geometric mean; 90th, Estimated 90th percentile; FC, Fecal coliform; EC, *Escherichia coli*).

산어장 및 양식장에 설정된 15개 정점별 해수에 대한 30회 조사 결과, 총 450개의 해수 시료에서 검출된 분변계대장균의 농도 범위는 <1.8–49 MPN/100 mL로 확인되었으며, 분변계대장균의 기하평균 및 90th percentile은 각각 <1.8–2.3 및 2.3–5.6 MPN/100 mL로 계산되었다(Fig. 2, Table 1). 우리나라는 해역의 해수에서 검출되는 분변계대장균의 농도에 따라 3개의 등급으로 분류하며(지정해역, 준지정해역, 조건부해역), 미국에서는 5개 등급(허가해역, 조건부허가해역, 제한해역, 조건부제한해역, 금지해역)으로 분류하고 있다. 기하평균이 14 MPN/100 mL 미만일 경우를 우리나라 지정해역 수준으로 평가하고, 추가로 90th percentile이 43 MPN/100 mL를 초과하지 않을 경우 미국 허가해역 수준(생식용 패류 유통 가능 해역)으로 평가하고 있다(MOF, 2023; US FDA, 2023). 이에 따라 서해안 중부 연안에 설정된 바지락 조사정점 15개소에 해당하는 어장 및 양식장의 해수 내 분변계대장균 농도는 우리나라의 지정해역 수준이면서 미국의 허가해역 기준까지 충분히 부합하는 매우 양호한 위생상태를 나타내는 것으로 평가되었다.

바지락의 위생 안전성을 평가하기 위해 해수와 동일한 조사기간 및 빈도로 각 조사정점에서 최대 30회 시료를 채취하였으며, 미생물 분석 결과는 Table 1에 나타내었다. 조사기간 중 채취된 총 410개 바지락 시료에 대한 분변계대장균 및 대장균의 검출범위는 <18–240,000 및 <18–33,000 MPN/100 g이었으며, 일반세균수는 450–850,000 CFU/g으로 확인되었고, 조사정점별로 상당한 미생물 오염도 편차가 존재하는 것으로 나타났다.

바지락 체내 대장균의 기하평균은 최소 38 MPN/100 g (Y2 정점)에서 최대 1,304 MPN/100 g (W15 정점)까지 광범위한 분포 범위를 보였다. 특히, 강우 발생이나 일시적인 육상 오염원 유입 등 극단적인 오염 부하를 반영하는 90th percentile 값을 산출한 결과, 오염의 공간적 차별성이 더욱 뚜렷하게 관찰되었다(Fig. 2). M8 정점의 바지락 90th percentile 값은 145 MPN/100 g으로 조사 대상 중 가장 안정적인 수준을 유지한 반면, W15 정점은 기하평균의 약 8배를 초과하는 10,850 MPN/100 g이라는 매우 높은 오염도 수치가 확인되어 해당 바지락 어장 환경 내에 영향을 주는 간헐적 오염원들이 상당수 존재함을 나타내었다. 또한, 전반적인 미생물학적 안전성 및 부패 정도를 간접적으로 확인할 수 있는 일반세균수 분석 결과에서도 H8 정점이 최대 850,000 CFU/g을 기록하였으며, 이외 M3, D7, D20, Y2 및 H1 정점 역시 81,000–420,000 CFU/g의 높은 세균수가 검출되어 갯벌 저질 내 유기물 부하와 미생물 증식이 패류 체내에 직접적으로 반영되고 있음을 확인하였다.

국제적 수준의 패류 위생 및 안전관리체계를 운영하고 있는 EU의 기준체계에 따라 바지락 체내의 대장균(*E. coli*) 검출량을 적용하여 15개 생산해역에 대한 등급화 평가를 실시하였다. 분석 결과, 전체의 약 26.7%에 해당하는 단 4개 바지락 생산해역(M3, S18, CC5, CC7)만이 최고 수준의 위생 등급인 A등급을 획득하였다. 이들 A등급 정점은 바지락 체내 대장균 230 MPN/100 g을 초과하는 시료 수가 1–5개 내외로 철저히 통제되었으며, 특히 식중독 등 중대한 공중보건학적 위해를 유발할 수 있는 기준치인 700 MPN/100 g 초과 시료가 단 한 건도 발생하지 않아 즉각적인 생식(raw consumption) 및 원활한 수출이 가능한 수준의 안전성을 입증하였다.

반면, 나머지 11개 바지락 생산해역(D7, D20, H1, H8, Y2, M8, C5, C17, W13, W15, B2)은 모두 B등급 해역으로 분류되었다. B등급으로 편입된 원인에는 해역별로 뚜렷한 차이가 관찰되었다. C5 및 C17 정점의 경우, 대장균 최대 검출량이 490 MPN/100 g으로 700 MPN/100 g을 초과하는 고위험 시료는 없었으나, 230 MPN/100 g을 초과하는 빈도가 각각 9회 및 8회로 상시적인 경도 오염에 노출되어 있어 B등급 판정을 받았다. 가장 심각한 오염을 보인 W15 정점은 대장균 농도 범위가 45–33,000 MPN/100 g에 달했으며, 230 MPN/100 g 초과 시

료 수 25개, 700 MPN/100 g 초과 시료 수 21개라는 극단적인 오염 지표를 기록하였고, 해당 정점 주변에서 생산된 바지락에서 A형 간염 바이러스가 검출된 사례가 있는 만큼 즉각적인 위생관리 및 오염원 차단이 시급한 것으로 분석되었다(Kim et al., 2024).

또한 EU 규정상 B등급 해역에서 채취된 이매패류는 채취 후 즉시 식용으로 유통될 수 없으며, 반드시 승인된 육상 정화시설에서 패류 정화를 거쳐 체내 대장균 농도를 A등급 수준(230 MPN/100 g 이하)으로 강제 저감하는 공정이 의무화되어 있다(Lees, 2000). 따라서 바지락 생산해역 중 B등급의 존재는 향후 바지락과 같은 갯벌 서식 수산물의 안전성 확보를 위한 맞춤형 정화 기술·시설 보급 및 행정 절차 등 위생관리 정책이 나아가야 할 명확한 방향성을 제시하고 있다고 판단된다. 특히 C5와 C17 정점과 같이 상시 경도 오염(230 MPN/100 g 초과)을 보이는 해역과, W15와 같이 극단적 오염(700 MPN/100 g 초과)을 보이는 해역은 각기 다른 패류 정화 전략이 요구됨을 보여주고 있다.

본 연구에서 관찰된 바지락 체내의 미생물 농축은 생리적 특성뿐만 아니라 바지락이 서식하는 갯벌 조간대 환경 특성과도 연관성이 높다. 갯벌 조간대는 육상으로부터 유입된 하천, 생활하수, 농·축산 폐수 등에 포함된 오염물질이 1차적으로 도달하는 완충 지대이다(Younger et al., 2003). 이처럼 바지락이 생산되는 마을어장이 갯벌 조간대에 형성되어 있어 주변 마을로부터 배출되는 다양한 오염원(병원성 세균 및 바이러스 등)에 쉽게 노출될 가능성이 높다. 이렇게 유입된 분변계대장균 등 오염

Table 1. Bacteriological water quality and contamination level of short-necked clam (*Ruditapes philippinarum*) in shellfish growing areas

Area	Sample name	Seawater (MPN/100 mL)				Shellfish (MPN/100 g or CFU/g)										Classification
		Fecal coliform	GM[1)]	90th[2)]	N	Fecal coliform	GM	90th	*Escherichia coli*	GM	90th	>230	>700	Plate count	N[3)]	
Incheon Metropolitan City	Y2	<1.8–4.5	<1.8	2.3	30	<18–7,900	54	899	<18–1,300	38	177	2	1	980–250,000	30	B
	M3	<1.8–23	2.1	4.1	30	20–7,900	111	1,005	<18–490	53	175	1	0	980–81,000	23	A
	M8	<1.8–23	2.0	3.7	30	<18–2,400	68	546	<18–1,300	39	145	1	1	820–92,000	23	B
Hwaseong-si	H1	<1.8–13	1.9	3.1	30	<18–240,000	106	1,880	<18–1,300	65	429	3	3	450–420,000	28	B
	H8	<1.8–13	2.1	3.9	30	<18–13,000	116	2,742	<18–2,400	81	551	3	3	520–850,000	28	B
Dangjin-si	D7	<1.8–23	2.1	5.1	30	<18–7,900	92	758	<18–2,400	56	337	2	1	790–83,000	19	B
	D20	<1.8–23	2.0	4.0	30	<18–4,900	75	679	<18–790	49	278	3	2	1,100–84,000	19	B
Taean-gun	S18	<1.8–7.8	2.0	3.3	30	20–330	88	276	<18–490	111	378	5	0	700–25,000	30	A
	CC5	<1.8–7.8	2.0	3.4	30	20–490	51	140	20–490	66	187	1	0	600–8,600	30	A
	CC7	<1.8–23	2.0	4.3	30	<18–490	74	237	<18–490	66	220	3	0	2,200–40,000	30	A
Boryeong-si	C5	<1.8–7.8	2.0	3.6	30	<18–790	144	580	20–490	153	505	9	0	400–18,000	30	B
	C17	<1.8–13	2.1	3.7	30	20–490	103	372	20–490	130	427	8	0	1,000–15,000	30	B
	W13	<1.8–13	2.0	3.7	30	<18–7,900	90	513	20–3,300	115	647	5	3	800–16,000	30	B
	W15	<1.8–49	2.3	5.6	30	<18–23,000	1,147	7,895	45–33,000	1,304	10,850	25	21	900–62,000	30	B
Buan-gun	B2	<1.8–49	2.1	5.1	30	<18–790	95	447	<18–1,300	106	466	4	2	500–32,000	30	B

[1)]GM, Geometric mean; [2)]90th, Estimated 90th percentile; [3)]The failure to obtain at least 30 samples was attributed to events such as the mass mortality during the study period. MPN, Most probable number; N, Number of samples; >230 and >700, Number of samples with *E. coli* exceeding 230 and 700 MPN/100 g.

원은 수층(water column) 상태에서 자외선과 염분 스트레스에 의해 빠르게 사멸하지만, 갯벌의 미세 퇴적물 입자에 흡착될 경우 생존 기간이 비약적으로 연장된다(Campos et al., 2013). 폭우나 강한 조류에 의해 갯벌 저질이 재부유(resuspension)할 때, 퇴적물에 흡착되어 있던 미생물이 바지락 여과섭식을 통해 체내로 급격히 유입되며, 이로 인해 바지락 체내에 미생물 오염이 발생할 가능성이 있다. 따라서 바지락 생산어장 및 양식장 주변의 오염원 영향평가를 통해 영향범위를 산정하여 체계적인 오염원 관리 정책이 수반될 필요가 있으며, 더 나아가 이러한 어촌계 마을 단위로 소규모 하수처리장이 지속적으로 확충될 필요가 있다고 판단된다. 그리고 바지락의 실질적인 위해성 평가를 위해서는 생산해역의 해수보다 바지락 체내 축적량을 독립적인 지표로 삼아 수행되어야 함을 본 연구 결과를 통해 확인하였다.

중금속 안전성 평가

분석 결과에 대한 유효성 검증을 위하여 MDL, LOQ 및 직선성 측정 결과는 Table 2와 같다. 각각의 표준용액으로 검량선을 작성하여 직선성 확인 결과 평균 0.999 이상의 결정계수(R^2) 값을 나타냈다. 또한 CRM 분석을 통한 회수율, 정확성 그리고 정밀성을 확인한 결과, 제시한 인증값에 대해 96.41–103.75%의 회수율을 보였으며, 정확성과 정밀성은 각각 -3.59–3.75% 및 0.67–2.78%로 나타났다(Table 3). 이러한 결과들은 국제적으로 활용하고 있는 분석 결과에 대한 유효성 지침(validation guidelines)에서 제시한 기준을 모두 충족하는 수준으로 확인되었다(CEC, 2002; Codex Alimentarius Commission, 2008).

15개 바지락 조사정점에 대해 중금속(9종)의 검출량을 분석한 결과(Table 4), 조사정점별로 바지락 체내 중금속 함량에 따른 공간적 차별성(spatial heterogeneity)이 확인되었다. 모든 조사정점에서 유해 중금속은 낮은 농도를 유지하였으나, 특정 정점에서는 다중 중금속 오염 현상이 확인되었다. 특히 S18 정점은 수은(Hg) 0.021 mg/kg, 납(Pb) 0.143 mg/kg 및 카드뮴(Cd) 0.173 mg/kg으로 측정되었으며, 전체 15개 조사정점 중 가장 높은 수준의 축적량을 나타내었다. 또한 해당 정점은 크롬(Cr) 0.522 mg/kg, 니켈(Ni) 0.817 mg/kg 및 은(Ag) 0.809 mg/kg 항목에서도 가장 높은 농도로 측정되어 단일 오염원이 아닌 복합적인 인위적 오염물질의 유입이 발생할 가능성이 있으므로, 해당 정점의 해수, 퇴적물 및 주변 오염원(산업폐수 등)에 대한 추가적인 중금속 오염도 분석이 필요할 것으로 사료된다. C17 정점 역시 비소(As) 4.519 mg/kg, 크롬(Cr) 0.507 mg/kg 및 수은(Hg) 0.013 mg/kg이 다른 조사정점에 비해 상대적으로 높은 축적량을 보였다. 반면, B2 정점과 CC5 정점은 수은(Hg) 0.008 mg/kg, 납(Pb) 0.044–0.063 mg/kg, 카드뮴(Cd) 0.115–0.121

Table 2. Quality parameters of analytical methods for determination of heavy metals

Parameters	Heavy metals								
	Hg	Pb	Cd	As	Cr	Cu	Ni	Zn	Ag
Linearity (R^2)	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999
MDL (μg/kg)[1)]	0.099	0.046	0.141	0.175	0.237	0.073	0.277	0.137	0.119
LOQ (μg/kg)[2)]	0.315	0.147	0.449	0.558	0.755	0.234	0.883	0.438	0.379

[1)]MDL=3.143×σ (σ, Standard deviation of the seven replicate determinations of standard solution).

[2)]LOQ=10×σ (σ, Standard deviation of the seven replicate determinations of standard solution). MDL, Method detection limit; LOQ, Limit of quantification.

Table 3. Recovery of certified standard reference materials

Parameter		Heavy metals								
		Hg	Pb	Cd	As	Cr	Cu	Ni	Zn	Ag
Certified value[1)] (mg/kg)	Mean	0.037	0.308	2.48	7.65	1.87	71.6	1.04	1,424	0.666
	Standard deviation	0.001	0.009	0.08	0.65	0.18	1.6	0.09	46	0.009
Observed value (mg/kg)	Mean	0.036	0.299	2.391	7.376	1.91	69.27	1.079	1,440.9	0.651
	Standard deviation	0.001	0.002	0.021	0.133	0.038	1.18	0.017	18.9	0.007
Recovery (%)		97.30	97.08	96.41	96.42	102.14	96.75	103.75	101.19	97.75
Accuracy (%)[2)]		-2.70	-2.92	-3.59	-3.58	2.14	-3.25	3.75	1.19	-2.25
Precision (%)[3)]		2.78	0.67	0.88	1.80	1.99	1.70	1.58	1.31	1.08

[1)]Certified values are from DORM-4 for chromium (Cr) and from SRM 1566b for the other eight heavy metals.

[2)]Accuracy (%Bias)=(Mean value for the seven replicate determinations-Certified concentrations)/Certified concentrations×100.

[3)]Precision (%CV)=Standard deviation for the seven replicate determinations/Mean value for the seven replicate determinations×100. CV, Coefficient of variation.

mg/kg 및 비소(As) 3.235–3.431 mg/kg으로 유해 중금속 항목의 농도가 비교적 낮아 바지락 서식환경이 위생학적으로 안전한 수준임을 확인하였다. 생물체 내 대사 과정에 필수적인 보조인자로 작용하는 아연(Zn)과 구리(Cu)는 각각 9.996–12.771 mg/kg, 0.984–1.602 mg/kg의 범위를 나타내어 비교적 좁은 농도 편차를 보였다. 비소(As)의 경우 2.919–4.519 mg/kg의 농도 범위를 보였으나, 이는 해양 생물 특성상 무독성 유기비소(arsenobetaine 등)의 형태로 축적되는 일반적인 해양 생태계의 기저 특성이 반영된 결과로 판단된다(Sakurai, 2002; Francesconi, 2010; Taylor et al., 2017). 하지만, 바지락 체내에서 검출된 비소의 위해성을 명확히 규명하기 위해 유기비소와 무기비소를 분리하여 분석·평가하는 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

본 모니터링 결과에서 확인된 정점 간 중금속 농도의 편차는 바지락과 같은 이매패류가 지닌 생리적 여과섭식 특성과 갯벌 저질 환경의 상호작용에서 기인한다고 판단된다(Copat et al., 2013). 이매패류는 다량의 해수와 부유 물질을 여과하는 과정에서 수층에 용존된 미량 금속뿐만 아니라, 미세 퇴적물(silt 및 clay) 입자에 흡착된 중금속을 아가미와 소화선 조직으로 강하게 농축한다(Rainbow, 2002). 특히 S18 및 C17 정점에서 관찰된 중금속(Pb, Cd, Cr, Ag 등)의 상대적 고농축 현상은 인근 해역의 오염원(산업단지 폐수, 어선 등 선박 도료의 용출 등) 영향 및 지형적으로 폐쇄성 내만에 위치하여 육상으로부터 유입된 오염물질이 갯벌의 미세 퇴적물 내에 장기적으로 축적되었음을 보여주고 있다(Wang et al., 2013). 은(Ag)이나 납(Pb)과 같은 원소는 해수 중 용해도보다 입자성 유기물과의 결합력이 강해 갯벌 표층 퇴적물에 침강하기 쉬우며, 조석 간만의 차나 폭우 등에 의해 퇴적물이 재부유할 때 바지락의 체내로 급격히 유입된다. 따라서 갯벌 패류의 중금속 안전성을 담보하기 위해서는 수질 모니터링에 국한되지 않고, 저질 퇴적물의 중금속 거동 및 용출 특성을 함께 추적하는 통합적인 모니터링 결과를 활용한 바지락 생산해역 관리가 필요할 것으로 판단된다.

Table 4. Heavy metal concentrations of short-necked clam (*Ruditapes philippinarum*) in shellfish growing areas (mg/kg, wet weight)

Area	Sample name	Heavy metals (mg/kg)[1]									No. of samples[2]
		Hg	Pb	Cd	As	Cr	Cu	Ni	Zn	Ag	
Incheon Metropolitan City	Y2	0.012±0.005^{ab} (0.007–0.017)	0.036±0.009^{ab} (0.029–0.046)	0.173±0.138^{a} (0.069–0.330)	3.692±1.226^{a} (2.616–5.027)	0.210±0.196^{a} (0.081–0.436)	1.509±0.268^{ab} (1.213–1.579)	0.464±0.259^{a} (0.293–0.761)	10.235±1.660^{a} (8.885–12.088)	0.273±0.075^{abc} (0.205–0.353)	3
	M3	0.014±0.008^{ab} (0.007–0.022)	0.080±0.028^{cde} (0.048–0.101)	0.147±0.078^{a} (0.074–0.228)	3.313±0.934^{a} (2.339–4.200)	0.317±0.233^{a} (0.227–0.581)	1.371±0.211^{ab} (1.188–1.602)	0.438±0.090^{a} (0.393–0.541)	10.801±1.417^{a} (9.324–12.148)	0.516±0.217^{bc} (0.281–0.709)	3
	M8	0.014±0.008^{ab} (0.006–0.022)	0.082±0.033^{cde} (0.049–0.115)	0.155±0.096^{a} (0.069–0.259)	3.287±1.155^{a} (1.956–4.011)	0.379±0.298^{a} (0.176–0.721)	1.389±0.329^{ab} (1.063–1.720)	0.488±0.112^{a} (0.359–0.561)	11.108±1.014^{a} (10.074–12.100)	0.779±0.400^{abc} (0.341–1.123)	3
Hwaseong-si	H1	0.010±0.002^{a} (0.008–0.011)	0.029±0.006^{a} (0.024–0.033)	0.100±0.006^{a} (0.095–0.104)	3.262±0.359^{a} (3.008–3.516)	0.103±0.026^{a} (0.085–0.121)	1.251±0.139^{ab} (1.153–1.349)	0.327±0.038^{a} (0.300–0.354)	9.996±1.031^{a} (9.266–10.725)	0.300±0.041^{a} (0.271–0.329)	2
	H8	0.010±0.003^{a} (0.007–0.012)	0.032±0.008^{a} (0.027–0.038)	0.107±0.049^{a} (0.072–0.142)	3.392±1.034^{a} (2.661–4.123)	0.105±0.059^{a} (0.063–0.147)	1.367±0.003^{ab} (1.365–1.369)	0.365±0.026^{a} (0.347–0.384)	10.582±0.256^{a} (10.401–10.763)	0.248±0.208^{a} (0.101–0.395)	2
Dangjin-si	D7	0.012±0.005^{ab} (0.005–0.018)	0.048±0.017^{abc} (0.028–0.062)	0.148±0.109^{a} (0.057–0.306)	2.969±0.681^{a} (2.134–3.713)	0.482±0.618^{a} (0.069–1.196)	1.320±0.356^{ab} (1.050–1.810)	0.780±0.693^{a} (0.276–1.574)	11.393±1.576^{a} (9.772–13.405)	0.565±0.495^{abc} (0.223–1.197)	3
	D20	0.012±0.005^{ab} (0.007–0.017)	0.044±0.023^{abc} (0.029–0.071)	0.107±0.038^{a} (0.066–0.142)	3.010±0.583^{a} (2.345–3.432)	0.231±0.232^{a} (0.080–0.498)	1.163±0.068^{ab} (1.117–1.241)	0.471±0.312^{a} (0.289–0.832)	11.532±3.250^{a} (8.952–15.182)	0.337±0.026^{ab} (0.315–0.365)	3
Taean-gun	S18	0.021±0.013^{b} (0.010–0.039)	0.143±0.093^{e} (0.066–0.277)	0.173±0.064^{a} (0.093–0.248)	3.826±0.889^{a} (2.823–4.769)	0.522±0.306^{a} (0.160–0.865)	1.602±0.477^{b} (1.129–2.092)	0.817±0.370^{a} (0.538–1.261)	11.572±1.368^{a} (10.192–12.818)	0.809±0.514^{c} (0.196–1.371)	3
	CC5	0.008±0.003^{a} (0.004–0.011)	0.063±0.021^{bcd} (0.039–0.090)	0.115±0.035^{a} (0.077–0.157)	3.235±0.985^{a} (2.029–4.288)	0.229±0.187^{a} (0.074–0.489)	1.077±0.127^{ab} (0.972–1.251)	0.413±0.280^{a} (0.218–0.817)	10.627±1.358^{a} (8.717–10.948)	0.176±0.060^{a} (0.117–0.258)	3
	CC7	0.008±0.003^{a} (0.004–0.010)	0.070±0.033^{bcd} (0.045–0.116)	0.121±0.042^{a} (0.066–0.166)	2.919±0.497^{a} (2.355–3.547)	0.311±0.151^{a} (0.110–0.464)	1.330±0.592^{ab} (0.743–2.148)	0.482±0.212^{a} (0.284–0.753)	10.712±1.178^{a} (9.073–11.606)	0.177±0.125^{a} (0.087–0.362)	3
Boryeong-si	C5	0.010±0.004^{a} (0.005–0.014)	0.090±0.011^{de} (0.079–0.105)	0.122±0.028^{a} (0.090–0.131)	3.725±0.791^{a} (2.692–4.529)	0.317±0.079^{a} (0.244–0.383)	1.226±0.063^{ab} (1.165–1.304)	0.494±0.171^{a} (0.362–0.497)	11.526±1.252^{a} (10.077–13.129)	0.370±0.105^{abc} (0.253–0.507)	3
	C17	0.013±0.006^{ab} (0.008–0.020)	0.117±0.024^{e} (0.085–0.131)	0.164±0.099^{a} (0.098–0.311)	4.519±1.207^{a} (3.695–6.285)	0.507±0.285^{a} (0.276–0.914)	1.332±0.097^{ab} (1.212–1.443)	0.636±0.370^{a} (0.347–1.073)	12.771±0.830^{a} (11.627–13.249)	0.606±0.193^{abc} (0.331–0.692)	3
	W13	0.011±0.003^{ab} (0.009–0.016)	0.106±0.010^{e} (0.093–0.118)	0.135±0.069^{a} (0.097–0.233)	3.910±0.862^{a} (2.901–4.553)	0.421±0.163^{a} (0.296–0.650)	1.375±0.135^{ab} (1.242–1.551)	0.580±0.288^{a} (0.381–1.005)	11.895±0.497^{a} (11.664–12.636)	0.536±0.070^{abc} (0.450–0.595)	3
	W15	0.012±0.004^{ab} (0.009–0.018)	0.098±0.042^{bcd} (0.070–0.160)	0.118±0.042^{a} (0.079–0.176)	3.756±1.141^{a} (2.627–4.879)	0.440±0.167^{a} (0.300–0.656)	1.452±0.375^{ab} (1.014–1.892)	0.644±0.333^{a} (0.416–1.136)	12.528±2.643^{a} (9.968–15.954)	0.510±0.181^{abc} (0.378–0.776)	3
Buan-gun	B2	0.008±0.002^{a} (0.005–0.010)	0.044±0.017^{abc} (0.022–0.058)	0.121±0.049^{a} (0.081–0.190)	3.431±1.291^{a} (1.737–4.698)	0.214±0.241^{a} (0.068–0.575)	0.984±0.154^{a} (0.844–1.175)	0.422±0.227^{a} (0.263–0.755)	11.601±2.869^{a} (8.474–14.478)	0.144±0.039^{a} (0.094–0.187)	3

[1]Values in the same column with different superscript letters are significantly different ($P<0.05$); [2]The failure to obtain at least 3 samples was attributed to events such as the mass mortality during the study period. Values are mean±standard deviation (minimum–maximum).

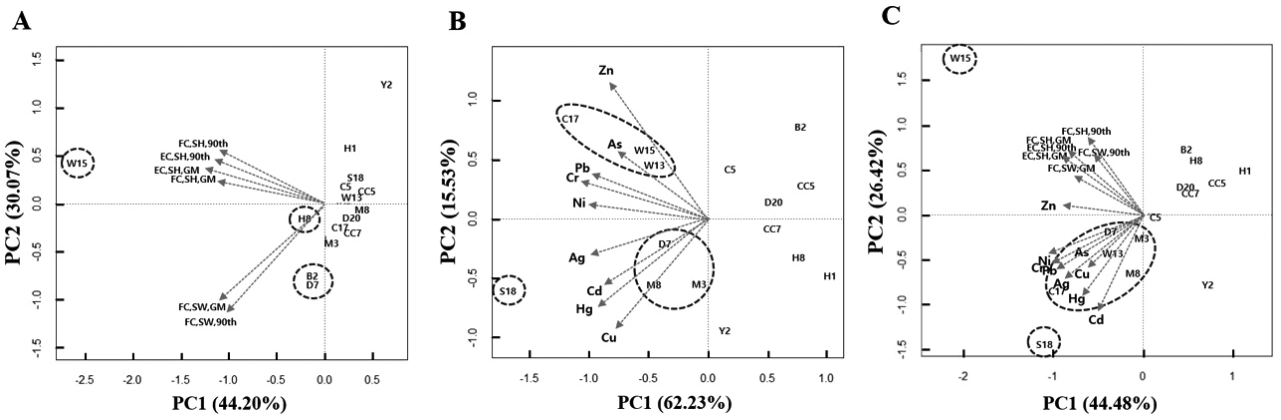


Fig. 3. Biplot of the principal component analysis showing the relationship between growing areas [SH, Short-necked clam (*Ruditapes philippinarum*) and SW, Seawater] and contamination sources (A, Fecal indicator bacteria; B, Heavy metals; C, Fecal indicator bacteria and heavy metals) (GM, Geometric mean; 90th, Estimated 90th percentile; FC, Fecal coliform; EC, *Escherichia coli*; PC, Principal component).

패류 생산해역의 식품 안전 및 품질 향상에 있어, 본 분석 결과는 한국산 바지락의 대(對) EU 수출 등급 유지 및 확대를 위한 중요한 객관적 지표로 활용될 수 있다. EU의 패류 중금속 허용 기준(Commission Regulation (EU) 2023/915)에 따르면, 이매패류의 유해 중금속 상한치는 납(Pb) 1.5 mg/kg, 카드뮴(Cd) 1.0 mg/kg, 수은(Hg) 0.5 mg/kg (습중량 기준)으로 규정되어 있다(European Commission, 2023).

본 조사에서 가장 높은 유해 중금속 농도를 기록한 S18 정점의 수치조차 납 0.143 mg/kg, 카드뮴 0.173 mg/kg, 수은 0.021 mg/kg에 불과하여, EU가 요구하는 상한치의 약 1/6 이하 수준으로 완벽하게 관리되고 있음을 증명하였다. 즉, 15개 조사정점이 수산물 수출 및 생식용 패류 공급에 있어 중금속에 대한 화학적 위해성으로부터 안전성이 입증되고, '청정 해역'으로서 위생학적 의의가 있다고 판단된다.

비록 모든 조사정점이 EU 기준치를 큰 폭으로 하회하며 우수한 위생 안전성을 증명하였으나, 특정 정점(S18 및 C17)을 중심으로 중금속 축적 경향이 관찰된 점은 선제적 관리 차원에서 중대한 시사점을 제시하고 있다. 바지락이 서식하는 갯벌 환경의 특성상 인근 산업단지의 확장이 지속되거나, 해류 변화로 인한 미세 퇴적물 침적 위치가 변경될 경우 지속적인 환경변화에 따라 향후 농도가 증가할 가능성이 있으므로 장기적인 모니터링이 필요하다(Kim et al., 2008; Hwang et al., 2016; Lee et al., 2018). 따라서, EU 등 글로벌 수준의 패류에 대한 중금속 안전 수준을 지속적으로 만족시키기 위해서는 오염 부하가 높은 해역에 대해 모니터링 빈도를 상향 조정하는 집중 관리 체계를 구축할 필요가 있다고 생각된다.

다변량 통계분석

해수의 분변계대장균 오염 지표와 바지락 체내 미생물 농축 지표, 그리고 바지락 체내 중금속 9종(Hg, Pb, Cd, As, Cr, Cu, Ni, Zn, Ag)의 복합적 영향도를 파악하기 위해 rda 함수를 활용한 PCA를 수행한 결과, 조사정점별 오염 특성이 명확한 공간적 군집으로 구별되었다(Fig. 3). 가장 특징적인 경향을 보인 W15 정점은 바지락 체내 분변계대장균 및 대장균에 대한 기하평균(1,304 MPN/100 g) 및 90th percentile (10,850 MPN/100 g) 벡터의 강한 영향을 받아 2차원 공간상에서 독자적인 고농도 미생물 오염 군집을 형성하였다. 반면 S18 및 C17 정점은 중금속 부하 벡터와 강한 양의 상관관계를 나타냈다. S18 정점은 Pb (0.143 mg/kg), Cd (0.173 mg/kg), Cr (0.522 mg/kg), Cu (1.602 mg/kg), Ag (0.809 mg/kg) 등 다수 중금속에서 최고 농도를 기록하였으며, C17 정점은 As (4.519 mg/kg) 및 Zn (12.771 mg/kg)의 높은 축적량을 바탕으로 중금속 영향권 정점군을 구성하였다. 이와 달리 Y2, CC5, CC7, D20 등의 정점은 미생물 및 중금속 영향 벡터의 반대편에 위치하여 상대적으로 위생학적으로 안전한 해역 특성을 보였다.

본 연구의 PCA 결과는 해수 수질 지표와 패류 체내 축적 물질 간의 유의미한 이질성을 보여주며, 이는 연안 및 갯벌 환경에서의 맞춤형 수산물 안전관리 전략 수립에 중요한 과학적 근거를 제공한다. W15 정점에서 관찰된 해수 수질에 비해 바지락 체내 미생물 오염도가 압도적으로 높게 나타난 것은 육상 오염원의 일시적 유입이나 해역 내 정체구역 형성, 저질 환경에서의 미생물 잔류성 증가 등 복합적 환경 인자가 작용한 결과로 해석된다(Burkhardt and Calci, 2000; Campos et al., 2013). 또한, S18 및 C17 정점 중심의 중금속 축적 경향은 인근 연안의 산업·생활 폐수 유입 및 퇴적물 내 중금속 거동과 밀접한 연관이 있다(Wang et al., 2013). 패류 체내 중금속 축적은 서식 환경 농도 및 노출 기간과 비례하며(Usero et al., 2005), 이는 만성적 위해 요인으로 작용할 수 있다고 판단된다.

따라서 EU의 패류 위생 규격 및 수산물 안전 기준(European Commission Regulations)을 만족하고 서해안 바지락의 수출

경쟁력 및 품질을 확보하기 위해서는 앞서 고찰한 세균학적 안전성과 중금속 안전성에서 언급한 바와 같이 조사정점별 오염원에 맞춘 차별화된 관리가 요구된다. 미생물 오염이 주원인인 W15 구역은 육상 오염원 차단 및 정화 시스템 보급이 수반되어야 하며, S18 및 C17 구역은 퇴적물 및 수질 내 중금속 유입 원인을 추적하는 장기적 모니터링과 환경관리 정책이 병행되어야 한다고 사료된다.

사 사

이 논문은 2026년도 국립수산과학원 수산과학연구사업(R2026046, R2026055)의 지원으로 수행된 연구이며 연구비 지원에 감사드립니다.

References

Ahn IY, Ji JY, Choi HS, Pyo SH, Park H and Choi JW. 2006. Spatial variations of heavy metal accumulation in Manila clam, *Ruditapes philippinarum* from some selected intertidal flats of Korea. Ocean Polar Res 28, 215-224. https://doi.org/10.4217/OPR.2006.28.3.215.

AOAC. 2023. Official Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL. 22nd ed. Oxford University Press, New York, NY, U.S.A. https://doi.org/10.1093/9780197610145.001.0001.

APHA (American Public Health Association). 1970. Recommended Procedures for the Examination of Sea Water and Shellfish. 4th ed. American Public Health Association, Washington, DC, U.S.A., 1-47.

Burkhardt W and Calci KR. 2000. Selective accumulation may account for shellfish-associated viral illness. Appl Environ Microbiol 66, 1375-1378. https://doi.org/10.1128/AEM.66.4.1375-1378.2000.

Campos CJA, Kershaw SR and Lee RJ. 2013. Environmental influences on faecal indicator organisms in coastal waters and their accumulation in bivalve shellfish. Estuaries Coasts 36, 834-853. https://doi.org/10.1007/s12237-013-9599-y.

CEC (The Commission of the European Communities). 2002. Commission Decision of 12 August 2002 implementing Council Directive 96/23/EC concerning the performance of analytical methods and the interpretation of results (2002/657/EC). Off J Eur Commun L221, 8-36.

Codex Alimentarius Commission. 2008. Report of the Twenty-ninth Session of the Codex Committee on Methods of Analysis and Sampling. Retrieved from https://www.fao.org/input/download/report/695/al31_18e.pdf on July 27, 2026.

Copat C, Arena G, Fiore M, Ledda C, Fallico R, Sciacca S and Ferrante M. 2013. Heavy metals concentrations in fish and shellfish from eastern Mediterranean Sea: consumption advisories. Food Chem Toxicol 53, 33-37. https://doi.org/10.1016/j.fct.2012.11.038.

European Commission. 2019. Commission Implementing Regulation (EU) 2019/627 laying down uniform practical arrangements for the performance of official controls on products of animal origin intended for human consumption in accordance with Regulation (EU) 2017/625 of the European Parliament and of the Council. Off J Eur Union L131, 51-100. Retrieved from https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2019/627/oj/eng on July 27, 2026.

European Commission. 2023. Commission Regulation (EU) 2023/915 of 25 April 2023 on maximum levels for certain contaminants in food and repealing Regulation (EC) No 1881/2006. Off J Eur Union L119, 103-157. Retrieved from https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/915/oj/eng on July 27, 2026.

Francesconi KA. 2010. Arsenic species in seafood: origin and human health implications. Pure Appl Chem 82, 373-381. https://doi.org/10.1351/PAC-CON-09-07-01.

Gavrilovic A, Srebocan E, Pompe-Gotal J, Petrinec Z, Prevendar-Crnic A and Matasin Z. 2007. Spatiotemporal variation of some metal concentrations in oysters from the Mali Ston Bay, south-eastern Adriatic, Croatia-potential safety hazard aspect. Vet Med-Czech 52, 457-463. https://doi.org/10.17221/2047-VETMED.

Hwang DW, Kim SG, Choi M, Lee IS, Kim SS and Choi HG. 2016. Monitoring of trace metals in coastal sediments around Korean Peninsula. Mar Pollut Bull 102, 230-239. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.09.045.

Kim DH, Lee JH, Choi WS, Cho SR, Jeong YG and Yu HS. 2025a. Evaluation of the impact of inland pollution source on seawater and short neck clam (*Ruditapes philippinarum*) after rainfall in the Narodo area, Korea. Korean J Malacol 41, 159-171. https://doi.org/10.9710/kjm.2025.41.3.159.

Kim JG, You SJ and Ahn WS. 2008. Evaluation of characteristics of particle composition and pollution of heavy metals for tidal flat sediments in Julpo Bay, Korea. J Korean Soc Mar Environ Saf 14, 247-256.

Kim JY, Jeong YG, Hwang JI, Kim YJ, Park BM and Oh EG. 2025b. Evaluation of microbiological safety and artificial depuration system for shellfish in the west coast, Korea. Korean J Fish Aquat Sci 58, 675-682. https://doi.org/10.5657/KFAS.2025.0675.

Kim PG, Park ME, Sung KY, Lim ST and Oh SM. 2009. Comparative study on distribution of heavy metals of the surface sediments in east/west oceanic dumping areas. Econ Environ Geol 42, 121-131.

Kim YW, Chae SH and Yang JS. 2024. Surveillance of hepatitis A virus and its outbreak status in the Republic of Korea, 2019 to 2022. Public Health Wkly Rep 17, 404-417. https://doi.org/10.56786/PHWR.2024.17.10.2.

Lee J, Park KT, Lim JH, Yoon JE and Kim IN. 2018. Hypoxia in Korean coastal waters: a case study of the natural Jinhae Bay and artificial Shihwa Bay. Front Mar Sci 5, 70. https://

doi.org/10.3389/fmars.2018.00070.

Lee JH, Kim DH, Hong YW, Kim PH, Yu HS and Choi WS. 2024. Evaluation of the effect of the inland pollution source and waste water treatment system on seawater and ark shell (*Anadara kagoshimensis*) after rainfall in the Yeoja Bay, Korea. Korean J Malacol 40, 221-231. https://doi.org/10.9710/kjm.2024.40.4.221.

Lee KJ, Kang EH, Yoon MC, Jo MR, Yu HS and Son KT. 2022. Concentration of heavy metals in shellfishes and health risk assessment from Korean coastal areas. Fish Aquat Sci 25, 626-636. https://doi.org/10.47853/FAS.2022.e57.

Lee YS, Jo YH, Byun IS, Kang SW, Cho EM, Han YS, Choi SH, Park HS, Kho WG, Ahn IY and Jeong KH. 2006. Bioaccumulation of heavy metals in *Ruditapes philippinarum*. Korean J Malacol 22, 157-165.

Lees D. 2000. Viruses and bivalve shellfish. Int J Food Microbiol 59, 81-116. https://doi.org/10.1016/S0168-1605(00)00248-8.

MFDS (Ministry of Food and Drug Safety). 2023. Food Code. Retrieved from https://various.foodsafetykorea.go.kr/fsd/#/ext/Document/FC on July 27, 2026.

MOF (Ministry of Oceans and Fisheries). 2023. Ministry of Oceans and Fisheries Notice No. 2023-697 on Sanitary Standards for Water Quality in Shellfish Growing Areas. Retrieved from https://www.law.go.kr/LSW/admRulLsInfoP.do?admRulSeq=2100000223110 on July 27, 2026.

MOF. 2024. Survey on fisheries production and distribution industry. Retrieved from https://www.mof.go.kr/doc/ko/selectDoc.do?docSeq=61650&listUpdtDt=2024-12-27++10%3A00&menuSeq=1009&bbsSeq=22 on July 27, 2026.

Nguyen Thanh Kim H, Duong VH, Chu TT, Pham-Thi TX, Nguyen XQ, Van Vu S, Van TP, Ta DT, Duong DT, Tursunov O, Priyadharshini M, Musthafa MS, Hegedűs M, Shahrokhi A and Kovács T. 2025. Mussels as bioindicators for the rapid detection of heavy metal fluctuations in marine coastal waters: a case study of seasonal bioaccumulation monitoring and assessment of *Perna viridis* from the Gulf of Tonkin coastline, Hai Phong, Vietnam. Water 17, 2552. https://doi.org/10.3390/w17172552.

Rainbow PS. 2002. Trace metal concentrations in aquatic invertebrates: why and so what? Environ Pollut 120, 497-507. https://doi.org/10.1016/S0269-7491(02)00238-5.

Sakurai T. 2002. Biological effects of organic arsenic compounds in seafood. Appl Organomet Chem 16, 401-405. https://doi.org/10.1002/aoc.325.

Shin SB, Choi WS, Lee JH, Kim MJ and Lim CW. 2022. Assessment of bacteriological safety of the seawater and abalone (*Haliotis discus hannai*) in the Bogil-Nohwa area, Korea. Korean J Malacol 38, 147-156. https://doi.org/10.9710/kjm.2022.38.3.147.

Statistics Korea. 2025. Statistic Database for Fisheries Production in KOSIS (Korean Statistical Information Service). Retrieved from https://kosis.kr/statisticsList/statisticsListIndex.do?vwcd=MT_ZTITLE&menuId=M_01_01#content-group on July 27, 2026.

Taylor V, Goodale B, Raab A, Schwerdtle T, Reimer K, Conklin S, Karagas MR and Francesconi KA. 2017. Human exposure to organic arsenic species from seafood. Sci Total Environ 580, 266-282. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.113.

US EPA (US Environmental Protection Agency). 1995. Guidance for Methods Development and Methods Validation for the Resource Conservation and Recovery Act (RCRA) Program. US EPA, Washington, DC, U.S.A.

US FDA (Food and Drug Administration). 2023. National Shellfish Sanitation Program Guide for the Control of Molluscan Shellfish. U.S. Food and Drug Administration (Revision 2023). Retrieved from https://www.fda.gov/nssp on July 27, 2026.

Usero J, Morillo J and Gracia I. 2005. Heavy metal concentrations in molluscs from the Atlantic coast of southern Spain. Chemosphere 59, 1175-1181. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.11.089.

Wang SL, Xu XR, Sun YX, Liu JL and Li HB. 2013. Heavy metal pollution in coastal areas of South China: A review. Mar Pollut Bull 76, 7-15. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.08.025.

Younger AD, Lee RJ and Lees DN. 2003. Microbiological monitoring of bivalve mollusc harvesting areas in England and Wales: Rationale and approach. In: Proceedings of the 4th International Conference on Molluscan Shellfish Safety, Santiago de Compostela, Spain, 265-277.