

통영 도산·풍화 해역 내 하수처리장 배출수가 패류생산해역에 미치는 영향 평가

신혜영 · 조성래 · 이장원 · 김지훈 · 박큰바위 · 윤민철^{1*}

국립수산과학원 남동해수산연구소, ¹국립수산과학원 식품안전기공과

Assessment of the Impact of Wastewater Treatment Plant Effluents on Shellfish Harvesting Areas in the Dosan-Poonghwa Sea Area of Tongyeong

Hyeyoung Shin, Sung Rae Jo, Jang Won Lee, Ji Hoon Kim, Kunbawui Park and Minchul Yoon^{1*}

Southeast Sea Fisheries Research Institute, National Institute of Fisheries Science, Tongyeong 53085, Republic of Korea

¹Food Safety and Processing Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Republic of Korea

Tongyeong is an important shellfish harvesting area, that hosts the largest designated sea area for shellfish exports in South Korea. In particular, the Dosan-Poonghwa Sea Area in Tongyeong is a semi-enclosed bay with poor water circulation and significant pollution due to its proximity to urban areas. This study examined the distribution of fecal pollution indicators (total coliforms, fecal coliforms, male-specific coliphages, and norovirus G1/G2) in the influent and effluent of wastewater treatment plants (WWTP). This study assessed the impact of the effluent discharge on shellfish harvesting areas in the Dosan-Poonghwa Sea Area to better safeguard shellfish farms and guarantee the safety of harvested shellfish. A strong positive correlation was observed between total and fecal coliforms in both influent ($r=0.974$, $P<0.01$) and effluent ($r=0.779$, $P<0.05$), with no other significant correlations observed. The impacts of the effluent was evaluated according to NSSP guidelines. The volume of seawater required to dilute the effluent discharged per day was calculated. This evaluation indicated that surrounding aquaculture areas were not impacted, and no viruses were detected in oysters collected from the Dosan-Pungwha Sea Area.

Keywords: Effluent, Evaluation of the impact, Norovirus, Shellfish harvesting area, WWTP

서론

급격한 경제 성장으로 인한 수질 오염은 법제도 정비와 수질 관리시설의 확충 등으로 개선되고 있으나(Choi et al., 2015), 해안 지역의 산업화와 도시화가 가속되어 그로 인한 심각한 해양 환경 오염이 여전히 진행되고 있다(Hong, 1991; Sunlu, 2003; Burak et al., 2004; Gedik and Mugan-Ertugral, 2019; Xu and Zhang, 2022). 이러한 해양 환경 오염의 70-80%는 육상에서 기인한 오염원이 주원인이 되며(Hildering et al., 2009; Alam et al., 2018), 그 중 하수는 바다로 배출되는 가장 많은 양의 오염원으로(Islam and Tanaka, 2004), 전 세계적으로 해양 오염의 가장 큰 부분을 차지하고 있다(Wear and Thurber, 2015). 바다로 배출된 하수는 해양생태계를 오염시켜 바다 건강을 위

협하고 수산물을 다소비 하는 지역사회에서는 오염된 수산물의 섭취로 공중 보건에 위해가 되고 있다(Jambeck et al., 2020; OSS, 2021). 다른 수산물 보다도 이매패류는 서식지 주변의 병원체를 농축하고 날것으로 먹는 경우가 많아 세균, 바이러스, 해양생물독소 등의 전파 매개체가 되어 수인성 및 식품매개 감염병의 원인물질로 작용하고 있다(Rippey, 1994; Graczyk and Schwab, 2000). 특히, 인간 장내 바이러스는 분변-경구 감염 경로로 이매패류에 의해 전염되는 가장 일반적인 병원체로 알려져 있다(Lees, 2000). 따라서 오염된 해역에서의 패류 수확을 방지하기 위해 하수처리장 배출수를 비롯한 육상오염원으로 인한 수질 및 수산물 오염에 대한 영향 평가 필요하며, 한국을 포함한 미국, 유럽 연합 등 각국의 관리 당국은 분변오염 지표 미생물의 검출을 모니터링하는 위생조사를 실시하고 있다(Thompson et

*Corresponding author: Tel: +82. 55. 640. 4763 Fax: +82. 55. 641. 2036

E-mail address: yoonmc@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.2024.0438>

Korean J Fish Aquat Sci 57(4), 438-447, August 2024

Received 13 April 2024; Revised 3 June 2024; Accepted 8 July 2024

저자 직위: 신혜영(연구원), 조성래(연구사), 이장원(연구사), 김지훈(연구사), 박큰바위(연구관), 윤민철(연구사)

al., 2005; WHO, 2010).

한편, 한국 패류 양식은 생산량을 기준으로 약 70%가 경상남도에서 이루어지며 그 중 곁은 80% 이상이 경상남도에서 생산된다(Statistics Korea, 2022). 이러한 높은 생산량으로 경남지역 패류 생산해역에 대한 위생조사는 패류 안전성 확보를 통한 국가 공중보건 향상과 패류 수출 확대에 큰 영향을 미친다. 경남지역 중 통영은 경남지역 전체의 약 34% 정도의 패류 양식어업권이 허가되어 있고, 이를 면적으로 보았을 때 전체의 약 35%를 차지하는 규모로(Statistics Korea, 2020, 2021), 국내 최대 수출용 패류생산 지정해역이 위치한 중요한 양식생산 단지이다(MOF, 2023). 특히, 도산·풍화 해역은 통영시 도산면부터 광도면, 명정동, 도천동 및 산양읍 풍화리 일대에 접해 있는 반폐쇄성 내만으로 해수 순환이 원활하지 못하고 해역의 북동쪽과 남동쪽은 통영시 도심지역과 연결된 북신만과 남만에 접해 있어 오염 부하량이 크다(NIFS, 2022). 또한, 통영시 전체의 약 24%에 해당하는 패류 양식어업권이 허가되어 통영시 전체 양식면적의 약 19%를 차지하고(Statistics Korea, 2020, 2021), 국내의 대표적인 굴 종자 단련장 중 하나가 통영 도산만에 위치하며 이곳에서 단련을 거친 종자 대부분이 통영 지역 내 자가 입식용으로 사용되고 있다(Kim et al., 2022).

그러나 국내의 패류 위생관리는 수입국의 요구에 따라 수출용 패류 위주로 이루어져 왔고 최근 내수용 패류의 위생관리 강화 필요성이 대두되면서(MFDS, 2017), 도산·풍화해역과 같이 내수용 패류 생산해역에 대한 위생조사가 강화되었다. 이에 반하여 도산·풍화해역에 위치한 25개소 마을 중 9개소 마을에서 배출되는 생활하수만 6개소 하수처리장에서 처리 후 해역으로 방류되어 도산·풍화해역의 가구 수 대비 하수처리율은 46.8%이며, 인구수 대비 하수처리율은 47.7%이다. 즉, 총 704 가구(1,333명)에서 배출되는 생활하수는 하수처리장에서 처리되지 못하고 생활하수관 등을 통하여 해역으로 유입되고 있다(NIFS, 2022).

따라서 본 연구에서는 도산·풍화 해역으로 유입되는 하수처리장 배출수의 분변오염지표 분포를 조사하고 해역에 미치는 영향평가를 통해 어장 환경을 보호하고 패류의 안전성을 확보하고자 한다.

재료 및 방법

조사 해역

본 연구의 조사해역인 도산·풍화해역은 경상남도 통영시 도산면부터 광도면, 명정동, 도천동 및 산양읍 풍화리 일대에 접해 있고, 해역의 북동쪽과 남동쪽은 통영시 도심지역과 연결된 북신만(무전동, 북신동 등) 및 남만(미수동, 봉평동, 중앙동 등)과 상당히 가까운 곳에 위치하고 있다. 이 해역은 동서 및 남북의 최대 길이가 약 7.8 및 8.0 km이며, 조사해역 면적은 약 32 km² 인 반폐쇄성 내만이다(Fig. 1). 해역의 수질에 영향을 미칠 것으

로 생각되는 배수유역은 도산면 저산리, 수월리, 법송리, 광도면 용호리, 명정동, 도천동 및 산양읍 풍화리가 있다. 배수유역의 하수는 도산면 저산리(동촌, 서촌), 수월리(수월, 상양지, 하양지) 및 법송리(법송산업단지), 광도면 용호리(용호) 및 도천동(민양, 천대·국치)의 경우 하수처리장을 통하여 처리되고 있으나 그 외 마을은 별도의 처리가 되지 않고 있다. 도산·풍화해역에는 총 262건(1,350.9 ha)의 양식어업권이 허가되어 있으며, 굴이 105건(455.6 ha)으로 가장 많았고, 우렁챙이 87건(206.1 ha), 진주조개 17건(58.3 ha), 미역 8건(26.0 ha), 담치류 7건(13.8 ha), 피조개 6건(52.1 ha), 어류 5건(11.7 ha), 가리비 3건(7.1 ha), 바지락 2건(6.4ha) 등이 있다(NIFS, 2022).

조사 시료

굴의 주 생산시기인 10월부터 다음해 4월까지의 주로 생굴 형태로 소비되고 있어, 본 연구에서는 굴 생산이 본격적으로 시작되는 달인 2023년 10월의 시료를 연구에 사용하였다. 도산·풍화해역 배수유역에는 서촌, 동촌, 수월, 법송 및 산양읍 마을단위 하수처리장과 통영시 공공하수처리장, 통영시 분뇨처리시설이 위치하고 있으며 각 시설의 유입수 및 배출수를 채취하여 분변오염지표 분포 및 패류 생산 해역에 대한 영향평가를 실시하였다. 또한, 하수처리시설 배출수의 분변오염지표 분포가 패류에 미치는 영향을 알아보기 위해 도산·풍화해역 내 4개 지점에서 굴을 채취하였다(Fig. 1).

도산면 저산리의 서촌 및 동촌마을의 오수는 각각 서촌(KIST sewage septic tank, KSST 공법; UV 소독, 처리용량 36 m³/day) 및 동촌(anaerobic-anoxic equalized bio contactor process, A2EBC 공법; UV 소독, 처리용량 30 m³/day) 하수처리장에서 처리되어 마을 앞 연안으로 방류된다. 도산면 수월리의 수월, 상양지 및 하양지마을의 오수는 수월하수처리장(ferrous nutrient removal, FNR공법; UV 소독, 처리용량 95 m³/day)에서 처리되어 수월박골천을 통해 연안으로 방류된다. 도산면 법송리의 법송산업단지 내 오수는 법송하수처리장(modified anaerobic-anoxic oxic, MA2O공법; UV 소독, 처리용량 490 m³/day)에서 처리되어 지법천을 통해 연안으로 방류된다. 광도면 용호리의 용호마을의 오수는 용호하수처리장(FNR 공법, UV 소독, 처리용량 70 m³/day)에서 처리되어 마을 앞 연안으로 방류된다. 산양읍 삼덕리와 남평리 일대에 발생하는 오수는 산양읍 하수처리장(biomecca sewage and wastewater treatment system-II, BSTS-II공법, UV 소독, 처리용량 500 m³/day)에서 처리되어 산양천을 통해 방류된다. 도천동의 민양 및 국치마을의 오수는 통영시 공공하수처리장(de nitrogen and phosphorus, Step 혐기호기 변법, UV 소독, 처리용량 54,000 m³/day)에서 처리되어 처리장 앞 연안으로 방류된다. 그리고 도산·풍화해역 배수유역에는 통영시 분뇨처리시설(액상부식법, UV 소독, 처리용량 103 m³/day)이 위치하고 있고, 시설 앞 연안(북신만)으로 처리수를 방류하고 있다(Table 1).

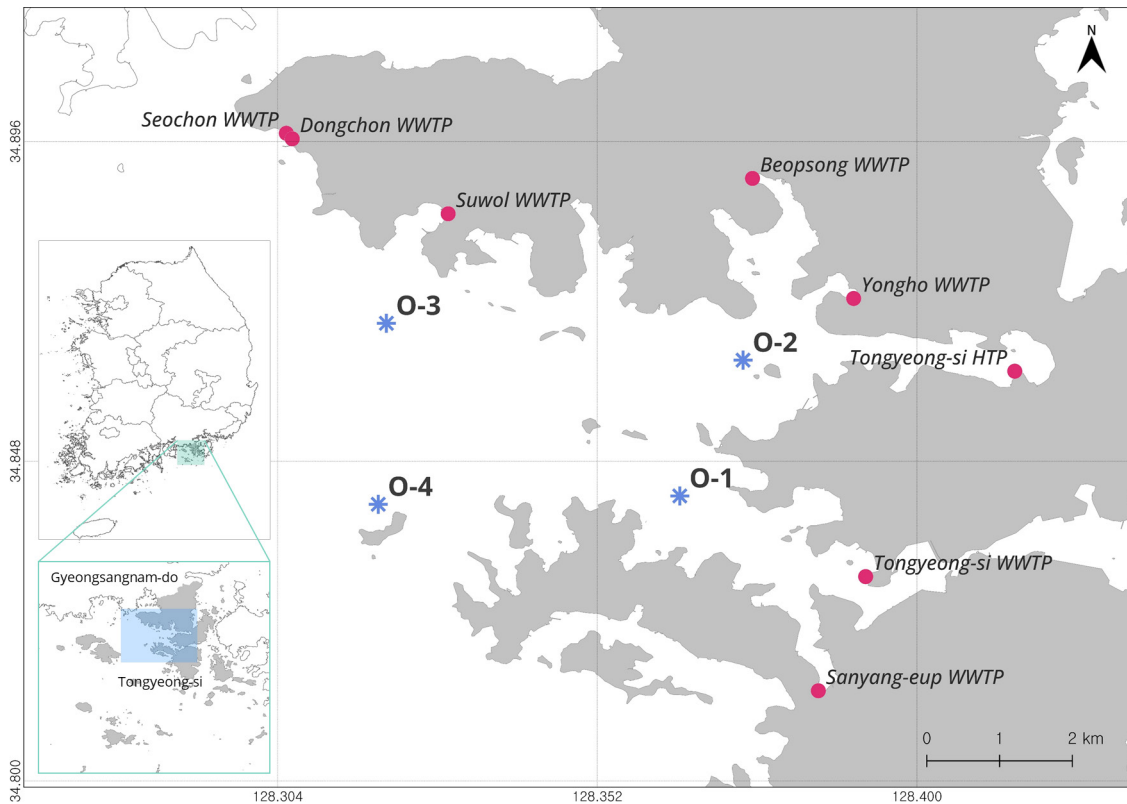


Fig. 1. Sampling locations of the study area in Tongyeong-si. Red dots represent land-based pollution sources, while blue asterisks indicate oyster *Crassostrea gigas* sampling locations.

분변오염지표 분석

대장균군 및 분변계 대장균 분석

대장균군 및 분변계 대장균 분석은 Laboratory Procedures for the Examination of Seawater and Shellfish 5th Ed. (APHA, 1984)를 따라 실시하였다. 먼저 추정시험으로 lauryl tryptose

broth (LTB; Difco, Franklin Lakes, NJ, USA) 10 mL에 단계 희석한 시료를 각각 5개 시험관에 3단계로 접종하였다. 시료가 접종된 시험관은 $35 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 의 incubator에서 24 ± 2 및 48 ± 3 시간까지 배양하였고, 가스가 생성된 시험관을 양성으로 판정하여 확정시험을 실시하였다. 확정시험은 양성으로 판정된 LTB 배양액을 brilliant green bile broth (BGLB; Difco) 및 EC

Table 1. Summary of WWTP and HTP in the drainage basin of Dosan-poonghwa sea area

Name	Treatment technology	Disinfection	Treated-wastewater discharge ($\text{m}^3 \text{ day}^{-1}$)	Effluent outfall	Feature
Seochon WWTP	KSST	UV	36	Coast in front of WWTP	
Dongchon WWTP	A2EBC	UV	30	Coast in front of WWTP	
Suwol WWTP	FNR	UV	95	Suwolbakgolcheon (stream)	Small-scale treatment plant, village level
Beopsong WWTP	MA2O	UV	490	Jibeopcheon (stream)	
Yongho WWTP	FNR	UV	70	Coast in front of WWTP	
Sanyang-eup WWTP	BSTS-II and Others	UV	500	Sanyangcheon (stream)	
Tongyeong-si public WWTP	DeNiPho, Anaerobic-aerobic alternating process	UV	54,000	Coast in front of WWTP	Large-scale treatment plant
Tongyeong-si public HTP	Liquid phase Corrosion method	UV	103	Coast in front of HTP	Large-scale treatment plant

WWTP, Wastewater treatment plant; HTP, Human excreta treatment plant.

medium (Difco)에 이식하여 각각 $35 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 의 incubator에서 $24 \pm 2 - 48 \pm 3$ 시간 및 $44.5 \pm 0.2^\circ\text{C}$ 의 water bath에서 24 ± 2 시간 배양 후 가스가 생성된 시험관을 양성으로 판정하였다. 대장균군 및 분변계 대장균 수는 BGLB 및 EC broth의 양성시험관 수로 최확수법 (most probable number method, MPN)에 따라 MPN/100 mL 또는 MPN/100 g의 단위로 표시하였다.

대장균(*E. coli*) 분석

대장균(*Escherichia coli*) 분석은 ISO/TS 16649-3:2015 (ISO, 2015)에 따라 실시하였다. 먼저 추정시험으로 Minerals Modified Glutamate medium (MMGM; Oxoid, Basingstock, Hampshire, UK) 10 mL에 단계 희석한 시료를 각각 5개 시험관에 3단계로 접종하였다. 시료가 접종된 시험관은 $37 \pm 1^\circ\text{C}$ 의 incubator에서 24 ± 2 시간 배양하였고, 노랗게 변색된 시험관을 양성으로 판정하여 확정시험을 실시하였다. 확정시험은 양성으로 판정된 MMGM 배양액을 Tryptone bile x-glucuronide agar (TBX agar; Merck, Darmstadt, Land Hessen, Germany)에 희선 도말하여 $44.0 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 incubator에서 21 ± 3 시간 배양 후 푸른색 콜로니가 형성되면 양성으로 판정하였다. 대장균 수는 확정시험에서 양성인 MMGM의 시험관 수로 MPN 법에 따라 MPN/100 mL 또는 MPN/100 g의 단위로 표시하였다.

Male specific coliphage (MSC) 분석

MSC (male specific coliphage) 분석은 Method to determine the presence of Male Specific Coliphage in shellfish meats and the microbiology, ISSC Proposal 05-114 (ISSC, 2009)에 따라 실시하였다. 분석에 사용된 숙주세포는 *E. coli* strain HS (pFamp) R (ATCC 700891)로 growth broth에 4-6시간 배양 후 사용하였다. 멸균된 2.5 mL soft agar에 숙주세포 배양액 0.2 mL와 시료 2.5 mL를 첨가 후 조심스럽게 균질화하여 bottom agar에 중첩시키고, 35°C 에서 24시간 배양하였다. 배양 후 생성된 전형적인 plaque를 계수하여 그 결과를 100 mL 또는 100 g 당 plaque forming unit (PFU)으로 나타내었다.

노로바이러스 분석

시료농축

하수처리시설의 유입수 및 배출수 시료의 농축은 Jiang et al. (2021)의 방법을 참고하여 시료의 특성 및 노로바이러스 검출에 알맞게 변형하여 실시하였다. 먼저, 시료의 부유물 제거를

위해 원심분리(8,000 g, 15 min)하여 상층액만 사용하였으며, 제조사의 지침에 따라 Stirred Ultrafiltration Unit (Amicon® stirred cell; Merck Millipore, Burlington, MA, USA)와 membrane (Ultrafiltration disc, 30 kDa NMWL; Merck Millipore)을 조립한 후 본 시료의 농축 전, stirred cell에 3차 증류수 50 mL를 넣고 가압하여(2 bar) 흘려보내며 membrane을 적셨다. 그 후 본 시료 400 mL를 400 mL stirred cell (UFSC40001)에 넣고 자석 교반기로 교반(200 rpm)하며가압(2-3 bar)하여 stirred cell안의 시료를 농축시켰다. Stirred cell 안의 시료가 50 mL에 도달하면 감압하여 시료를 회수하고 다시 50 mL stirred cell (UFSC05001)에 옮겨 교반 및 가압하여 (200 rpm, 2-3 bar) 10 mL에 도달할 때까지 농축하고 회수하였다.

RNA 추출

농축된 시료는 핵산자동추출기(Extractor MagPurix 12A; Zinexts Life Science Corp., New Taipei City, Taiwan)와 추출 키트(MagPurix Viral Nucleic Acid Extraction Kit, ZP02003; Zinexts Life Science Corp.)를 이용하여 제조사의 지침에 따라 RNA를 추출하여 PCR template으로 하였다.

Real time RT-PCR에 의한 노로바이러스 정성분석

Real time RT-PCR 반응을 위하여 PowerChek Foodborne Norovirus GI/GII Real-time PCR Kit (Kogenebiotech, Seoul, Korea)를 사용하였으며, strip tube에 담겨있는 premix 15 µL에 template RNA 5 µL를 넣어 반응액을 제조하였다. 양성대조군으로 kit에 함께 제공된 노로바이러스 GI/GII 유전자를, 음성대조군으로는 RNase free water를 사용하여 실험의 신뢰성을 확보하였다. 유전자 증폭을 위해 Thermal cycler dice TP950 (Takara, Tokyo, Japan)으로 45°C 에서 30분간 reverse transcription을 수행하고 95°C 에서 10분간 DNA를 변성 후 95°C 에서 15초, 56°C 에서 1분으로 45 cycles를 반복하였다.

패류생산해역에 대한 하수처리시설 배출수의 영향평가

노로바이러스 G1/G2가 검출된 하수처리시설 배출수를 대상으로 패류 생산해역에 미치는 영향을 평가하였다. 영향평가는 하루동안 배출되는 배출수의 양을 1,000:1로 희석시킬 수 있는 해수를 포함하는 해역의 면적을 반경으로 산출하여 평가하였으며(Hassard et al., 2017; US FDA, 2019), 영향평가를 위한 수식은 Table 2와 같다. 또한, 실제 도산·풍화해역에서 생산되고

Table 2. Estimation of the radius of influence for the effluent from WWTP

Equation name	Equation	Parameter
Daily load (MPN /day)	FC concentration (MPN/100 mL)×flow (L/min)	
Dilution water required (m ³ /day)	DL/standard level	FC; standard level: 14 MPN/100 mL
Impact area (m ² /day)	DWR/average depth (m)	
Radius of half-circle (m/day)	Square root (IA×2/3.14)	

WWTP, Wastewater treatment plant; FC, Fecal coliform; DL, Daily load; DWR, Dilution water required; IA, Impact area.

있는 굴에 미치는 영향을 알아보기로 지정된 4개 지점(Fig. 1)에서 채취한 굴에 대해 대장균, 분변계 대장균, MSC 및 노로바이러스 G1/G2를 분석하였다.

통계분석

분변오염지표들 간의 상관관계(pearson correlation)는 The R Project for Statistical Computing (version 4.3.2)을 이용하여 분석하였다.

결과 및 고찰

하수처리장 유입수 및 배출수의 분변오염지표 분포

하수처리장 유입수 및 배출수에서 대장균, 분변계 대장균, MSC 및 노로바이러스 G1/G2의 분포는 Table 3과 같다. 대장균은 유입수에서 13,000,000–240,000,000 MPN/100 mL 범위로 검출되었으나 배출수에서는 <1.8–13,000 MPN/100 mL 범위로 검출되어 하수처리과정 동안 평균 5.73 log₁₀ 감소되었다. 분변계 대장균은 유입수에서 2,400,000–130,000,000 MPN/100 mL (6.38–8.11 log₁₀ MPN/100 mL) 범위로 검출되었으나 배출수에서는 <1.8–330 MPN/100 mL 범위로 검출되어 하수처리과정 동안 평균 6.05 log₁₀ 감소되었다. 그 중 범송, 산양읍 하수처리장 및 통영시 분뇨처리장 배출수에서는 분변계 대장균이 모두 <1.8 MPN/100 mL로 검출되었으나, 동촌, 서촌, 수월, 용호, 통영시 하수처리장 배출수에서 17–330 MPN/100 mL로 검출되어 하수처리장 배출수의 분변계대장균 저감을 위해 소독장치에 대한 관리가 적절인지 확인이 필요한 것으로 생각된다. MSC는 유입수에서 19–86,000 PFU/100 mL 범위로 검출되었으나 배출수에서는 모두 <10 PFU/100 mL 이하로 검출되었다.

노로바이러스의 경우 유입수에서 검출되었으나 배출수에서 검출되지 않은 곳은 수월(G1), 용호(G2), 산양읍(G1), 통영시(G2) 하수처리장이며, 산양읍, 통영시 하수처리장은 상대적으

로 하수처리량이 많은 곳임에도 불구하고 배출수에서 노로바이러스가 검출되지 않은 것은 충분한 소독(UV) 과정을 통해 배출되었기 때문인 것으로 판단된다. 반대로 유입수에서 검출되지 않았으나 배출수에서 검출된 곳은 서촌(G2), 동촌(G1), 수월(G2) 하수처리장이었다. 이는 노로바이러스가 연중 배출되지만 매우 가변적이고 간헐적으로 배출되어 하수처리장에 유입되는 노로바이러스 농도에 변동이 있을 수 있고(Wang et al., 2020), 이러한 변동으로 샘플링 시점에는 검출될 수 없는 농도로 존재한 것으로 여겨진다. 또한, 하수 시료 채취 방법은 크게 순간 시료채취(grab sample)와 혼합 시료채취(composite sample)가 있다. 순간 시료채취는 15분을 초과하지 않는 시간 동안 수집되어 채수 당시의 수질 특성을 나타내며, 혼합 시료채취는 시간 경과에 따라 연속적으로 시료를 채취하거나 또는 일정시간동안 개별적으로 채취한 시료의 혼합을 통해 수집되어 수집 기간 동안의 평균적인 수질 특성을 나타내는데(US EPA, 2013), 본 연구에서는 순간 시료채취의 방법으로 하수를 채취하여 시료 채취 방법의 한계에서 비롯된 결과로 생각된다. 노로바이러스(G1)가 유입수와 배출수 모두에서 검출된 곳은 서촌, 범송, 용호 하수처리장과 통영시 분뇨처리장이며 하수처리과정을 거쳤음에도 유입수와 배출수에서 동일하게 노로바이러스가 검출된 것은 여러 선행 연구에서 밝혀진 대로 하수처리과정과 소독에 대한 노로바이러스의 저항력 때문인 것으로 보인다(Goettert, 2014; US FDA, 2019; Wang et al., 2020). 또한, 서촌, 용호 하수처리장과 통영시 분뇨처리장은 비교적 하수처리량이 적음에도 불구하고 배출수에서 노로바이러스가 검출되었는데, 범송 하수처리장과 함께 소독시설(UV)증설 등을 통한 노로바이러스 저감이 필요하며 병용처리 등의 새로운 하수처리공법 도입이 필요할 것으로 사료된다.

하수처리장 유입수 및 배출수의 분변오염지표들 간의 상관관계 분석

하수처리장 유입수 및 배출수에서의 분변오염지표들 간의 상

Table 3. Distribution of fecal pollution indicators in influent and effluent of WWTP and HTP

Name	TC ¹ (MPN/100 mL)		FC ² (MPN/100 mL)		MSC ³ (PFU/100 mL)		NoV G1 (+/-) ⁴		NoV G2 (+/-)	
	IF ⁵	EF ⁶	IF	EF	IF	EF	IF	EF	IF	EF
Seochon WWTP	13,000,000	790	4,900,000	220	19	<10	+	+	-	+
Dongchon WWTP	79,000,000	350	49,000,000	170	22,000	<10	-	+	-	-
Suwol WWTP	33,000,000	26	33,000,000	17	8,000	<10	+	-	-	+
Beopsong WWTP	22,000,000	<1.8	2,400,000	<1.8	40,000	<10	+	+	-	-
Yongho WWTP	240,000,000	130	130,000,000	49	12,000	<10	+	+	+	-
Sanyang-eup WWTP	70,000,000	<1.8	23,000,000	<1.8	86,000	<10	+	-	-	-
Tongyeong WWTP	17,000,000	13,000	7,900,000	330	37,000	<10	-	-	+	-
Tongyeong HTP	33,000,000	41	24,000,000	<1.8	1198	<10	+	+	-	-

¹Total coliform. ²Fecal coliform. ³Male specific coliphage. ⁴Norovirus (NoV) positive(+)/negative(-) confirmed by RT-PCR. ⁵Influent. ⁶Effluent. WWTP, Wastewater treatment plant; HTP, Human excreta treatment plant.

관관계(pearson correlation)를 분석한 결과, 유입수에서 대장균군과 분변계 대장균 간에는 매우 높은 양의 상관관계($r=0.974$, $P<0.01$)가 관찰되었으며, 배출수에서도 상당한 수준의 상관관계($r=0.779$, $P<0.05$)를 나타냈다. 하지만, 이외의 지표들 간에는 유의미한 상관관계가 발견되지 않았다(Table 4).

대장균 지표는 오랫동안 분변오염의 대표적인 지표로서 사용되어 왔지만, 환경에 대한 내성이 장내 바이러스와는 달라 장내 바이러스의 오염과 그로 인한 공중 보건 위험을 정확히 예측할 수 없는 한계가 있다(Plummer et al., 2014). 반면, Coliphage는 장내 바이러스와 비슷한 구조와 생존 능력을 가지고 있어 분변오염 지표 바이러스로 활용되고 있으나 사람의 분변에 드물게 발견되고 수온에 따라 사멸 속도가 달라지는 특성이 있어(Lee and Sobsey, 2011), 일부 연구에서는 바이러스성 병원체와 상관관계가 없다는 결과가 나타나기도 했다(McMinn et al., 2017; Dias et al., 2018). 이러한 결과로 미루어 보아 본 연구에서 대장균군과 분변계 대장균 이외에 세균성 지표와 바이러스성 지표 간의 상관관계가 발견되지 않은 것은 지표 미생물의 각기 다른 생활사와 환경 저항력 때문인 것으로 판단된다.

또한, 분자생물학 기술의 발달에 따라 많은 병원체의 검출이 가능해지면서 노로바이러스도 중합효소 연쇄 반응(polymerase chain reaction, PCR)을 통해 검출은 가능하지만 감염성 노로바이러스와 비감염성 노로바이러스의 구별은 불가능하다. 이에 광활성염료와 특정 수용체 등을 이용한 PCR 전처리방법이 개발되었으나 아직까지 비감염성 바이러스를 완전히 제

거할 수 없는 단계에 있다(Yang et al., 2022). 따라서, 하수처리장 배출수에서 MSC가 <10으로 검출되었지만 상관관계가 없 이 노로바이러스 G1 또는 G2가 양성으로 검출된 하수처리장(서촌, 동촌, 수월, 법송, 용호하수처리장, 통영시 분뇨처리장)은 RT-qPCR 검출 방법의 한계로서 노로바이러스의 감염성 여부와는 관계없이 검출된 것으로 여겨진다. 이에 대한 명확한 해석을 위해서는 노로바이러스의 활성 평가를 통해 감염력을 확인하는 방법에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

하수처리장 배출수가 패류 생산 해역에 미치는 영향

노로바이러스 G1/G2가 검출된 하수처리장 배출수(서촌, 동촌, 수월, 법송, 용호 하수처리장 및 통영시 분뇨처리장)에 대하여 해당 배출수의 양을 1,000:1로 희석하는데 필요한 해역 면적을 반경으로 지도에 나타내었으며, 하수처리장 배출구 인근 양식장도 함께 지도에 표시하였다(Fig. 2). 또한, 도산·풍화해역 내 4개 지점에서 채취한 굴의 대장균군, 분변계 대장균, MSC 및 노로바이러스 G1/G2의 분포는 Table 5와 같다. 그 중 O-2와 O-4는 분변계 대장균, 대장균, MSC, NoV가 모두 검출되지 않았고 O-1은 분변계 대장균이 20 MPN/100 g, O-3은 대장균이 20 MPN/100 g가 검출되었으며 식품의 기준 및 규격(MFDS, 2023)에 따른 생식용 굴에 대한 기준($n=5$, $c=1$, $m=230$, $M=700$ MPN/100g)에 적합한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 개방된 해양환경의 특성상 하수처리장 배출수 이외의 다른 육상오염원과 해상오염원으로 인해 굴 양식장이 오염될 수 있고, 굴은 여

Table 4. Correlation analysis of fecal contamination indicators in influent and effluent of wastewater treatment plants

Wastewater		Influent					Effluent			
Fecal indicator		TC	FC	MSC	NoV G1	NoV G2	TC	FC	NoV G1	NoV G2
TC ¹	r	1	0.946**	0.581	0.302	0.168	1	0.917**	-0.071	0.468
	P-value	-	0.000	0.131	0.467	0.691	-	0.001	0.867	0.242
	n	8	8	8	8	8	8	8	8	8
FC ²	r		1	0.667	0.410	0.417		1	-0.167	0.344
	P-value		-	0.071	0.313	0.304		-	0.693	0.404
	n		8	8	8	8	8	8	8	8
MSC ³	r			1	0.285	0.728*				
	P-value			-	0.494	0.040	MSC were not detected in the effluent			
	n			8	8	8				
NoV G1 ⁴	r				1	0.555			1	-0.121
	P-value				-	0.153			-	0.776
	n				8	8	8	8	8	8
NoV G2	r					1				1
	P-value					-				-
	n					8	8	8	8	8

¹Total coliform. ²Fecal coliform. ³Male specific coliphage. ⁴Norovirus (NoV), Norovirus was qualitatively assessed as either positive or negative. For correlation analysis, positive cases were assigned a value of 1, and negative cases were assigned a value of 0.

*P<0.05; **P<0.01.

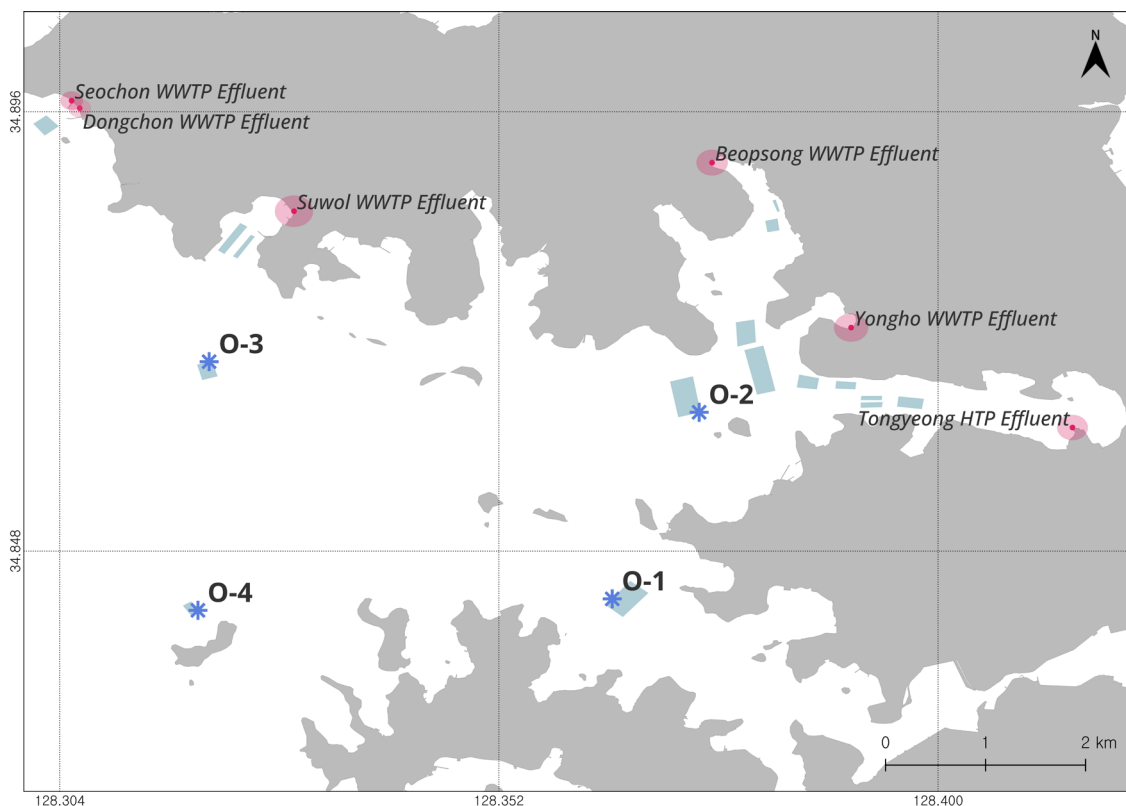


Fig. 2. Radius of influence of WWTP effluent where norovirus was detected. The red circles describe the radius of influence of WWTP effluent, and the blue rectangles represent the shellfish farm near the discharge outlet. WWTP, Wastewater treatment plant.

과 섭식 동물로서 주변 환경의 100배에 이르는 병원균 등의 미생물을 농축할 수 있다(US FDA, 2019). 따라서 생식용 굴에 대한 기준에는 적합하지만, 대장균이 검출될 수 있고 이를 방지하기 위해서는 하수처리장의 소독 설비 증설을 포함한 육·해상오염원에 대한 관리가 필요한 할 것으로 사료된다.

서촌, 동촌 하수처리장 배출수의 영향반경은 113 m이며 배출구로부터 인근 양식장까지의 거리는 각각 305 m, 301 m로 인근 양식장까지 영향을 미치지 않았고, 수월 하수처리장 배출수의 영향반경은 191 m이며 배출구로부터 인근 양식장까지의 거리는 497 m로 인근 양식장까지 영향을 미치지 않았다. 실제로

이들 하수처리장 배출구와 거리상 가까운 O-3, O-4 굴 역시 바이러스가 검출되지 않았다. 범송 하수처리장 배출수의 영향반경은 157 m이며 배출구로부터 인근 양식장까지의 거리는 772 m로 인근 양식장까지 영향을 미치지 않았고, 용호 하수처리장, 통영시 분뇨처리장 배출수의 영향반경은 각각 171 m, 154 m이며 배출구로부터 인근 양식장까지의 거리는 각각 911 m, 1,500 m로 인근 양식장까지 영향을 미치지 않았다. 마찬가지로 이들 하수처리장 배출구와 거리상 가까운 O-1, O-2 굴에서도 바이러스가 검출되지 않았다(Fig. 2).

이러한 결과는 하수처리장 배출수에 바이러스가 존재하더라도 양식장까지 충분한 완충 구역이 있어 굴을 오염시키지 않는 것으로 판단되나, 기후환경에 따라 오염 부하량이 증가할 우려가 있다. 특히, 기후변화로 집중호우가 빈번해지면서 하수 유입량이 급격히 증가하고, 폭염에 따른 상수도 및 용수 사용 증가도 하수 유입량 증가로 이어져 하수처리 공정에 부담을 주어 처리 효율을 저하시킨다. 뿐만 아니라 해수면 상승으로 불명수의 유입이 증가하여 유입 하수 중의 염분 농도 상승이 미생물 기반의 하수처리공정의 성능을 저하시킬 수 있다. 이러한 기후변화 요소들은 하수처리 효율을 떨어뜨리고, 처리되지 못한 하수가 방류되어 해양 생태계와 양식 산업에 해를 끼치게 된다(JWSDH,

Table 5. Distribution of fecal pollution indicators in shellfish

Shellfish	FC ¹ (MPN/100 g)	<i>Escherichia coli</i> (MPN/100 g)	MSC (PFU/100 g)	NoV G1 (+/-) ²	NoV G2 (+/-)
O-1	20	<18	ND ³	-	-
O-2	<18	<18	ND	-	-
O-3	<18	20	ND	-	-
O-4	<18	<18	ND	-	-

¹Fecal coliform. ²Norovirus (NoV) positive (+)/negative (-) confirmed by RT-PCR. ³ND, Not detected.

2020; MOE and KECO, 2018). 따라서 도산·풍화해역에서 생산되는 패류 및 수산물의 안전성을 확보하기 위해서는 기후 변화에 대응하여 하수처리 시설의 용량과 처리 능력을 강화하고, 기후 변화에 적합한 하수처리 적응전략 마련이 필요해 보인다. 또한, 정기적인 모니터링과 위험 관리 계획을 통해 변화하는 환경 조건에 따른 하수처리 시설의 성능을 지속적으로 평가하고 개선해야 할 필요가 있다고 여겨진다.

한편, 한국의 패류 위생관리 프로그램(Korean Shellfish Sanitation Program, KSSP)은 미국의 패류 위생관리 프로그램(National Shellfish Sanitation Program, NSSP)을 모체로 하여 구축되었다. NSSP는 1925년부터 오염된 해역에서 패류가 수확되는 것을 방지하기 위해 지표 세균 검출을 통한 정기적인 해수 및 패류 모니터링 등 위생조사를 실시함으로써, 패류로 인한 세균성 질병을 제어하는 예방적 식품 안전 관리 조치로서 그 효과가 역사적으로 증명되었다(US FDA, 2018, 2019). 그러나, 장내 바이러스의 경우 하수처리장에서의 처리과정과 소독에 저항력이 있어 하수처리장 최종 배출수에서 자주 검출되며, 패류는 주변의 해수보다 최대 100배까지 바이러스를 체내에 축적할 수 있고 현재 패류 생산 해역 분류에 사용되고 있는 지표 세균보다 체내에서 특정 바이러스를 더 오래 보유하는 등 기존의 세균성 지표가 바이러스성 질병의 위험을 예측하기에 충분하지 않음은 이미 많은 문헌을 통해 입증되었다(US FDA, 2019). 그에 따라 NSSP는 하수처리가 감염성 장내 바이러스를 완전히 제거하지 못하므로 하수배출원(sewage source)과 패류 생산해역 사이에서 충분한 희석을 통해 배출수 내 바이러스 및 다른 오염물질로 인한 위험을 감소시키는 것을 효과적인 전략으로서 제시하고 있다. 이러한 전략은 하수처리장 배출구 또는 공중보건상 중요한 다른 점 오염원의 배출구와 접해 있는 해역을 금지해역(prohibited area)으로 분류하고, 금지해역과 인접한 패류 생산해역의 분류에 따라 금지해역으로부터 패류 생산 해역까지 오염물질이 충분히 희석될 수 있도록 오염원의 유량, 미생물학적 수질 등을 고려하여 금지해역의 크기를 설정하게 된다.

패류 생산 해역의 분류 중 조건부 허가 해역(conditionally approved area)은 해역 관리 계획 상의 특정 조건을 제외하고 허가 해역의 기준을 충족하는 해역으로, 해역 수질에 영향을 미칠 수 있는 잠재적인 오염원은 있지만 이를 관리할 수 있는 충분한 자원과 기준이 있을 때 설정할 수 있다. 이에 바이러스의 충분한 저감을 통해서 하수처리장 배출구와 근접한 조건부 허가 해역에서 수확된 패류의 안전성을 보장하기 위해 하수처리장 배출수는 최소 1,000:1로 희석되어야 함을 권장하고 있다. 또한, 패류 생산 해역(허가해역)으로 하수처리장 등의 오염원 배출이 해역에 미치는 영향을 판단할 때는 최악의 경우 즉, 미처리 하수가 배출된 것을 가정하여 허가해역 기준(분변계 대장균 14 MPN/100 mL)에 충족할 수 있도록 충분히 희석되어야 함을 권장하고 있다(US FDA, 2019). 이에 본 연구에서는 하루동안 배출되는 하수처리장 배출수의 양을 1,000:1로 희석하는데 요구

되는 해수의 양을 해역의 반경으로 구하여 오염원이 패류 생산 해역에 미치는 영향을 평가하였다.

이상의 결과를 종합해보면, 본 연구에서는 굴 생산이 본격적으로 시작되는 10월에 통영 도산·풍화 해역 내 하수처리장의 유입수 및 배출수에 대한 분변오염지표 분포를 조사하고, 배출수가 해당 해역에 미치는 영향을 평가하였다. 하수처리장에서의 분변오염지표들 간의 상관관계(pearson correlation)를 분석한 결과, 유입수 및 배출수에서 대장균과 분변계 대장균 간에 높은 양의 상관관계(유입수, $r=0.974$, $P<0.01$; 배출수, $r=0.779$, $P<0.05$)를 나타냈지만 이외에 상관관계를 나타내는 지표는 없었다. 하수처리장 배출수의 영향평가는 노로바이러스가 검출된 배출수에 대하여 하루동안 배출되는 양을 희석하는데 요구되는 해수의 양을 해역의 반경으로 구하여 배출수가 패류 생산 해역에 미치는 영향을 평가하였다. 그 결과, 노로바이러스가 검출된 서촌, 동촌, 수월, 범송, 용호, 산양읍, 통영시 하수처리장과 통영시 분노처리장의 배출수는 인근 양식장에 영향을 미치지 않았으며 실제로 도산·풍화 해역 내 4개 지점에서 채취한 굴의 대장균, 분변계 대장균, MSC 및 노로바이러스 G1/G2의 분포를 보았을 때 배출수의 영향이 미치지 않은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 하수처리시설 설계 기준에 따른 처리 용량 내에서 정상적인 처리효율하에 나올 수 있는 결과로서 도산·풍화 해역에서 생산되는 패류에 대한 안전성 확보를 위해 본 연구 결과를 바탕으로 기상 및 기후 변화 등 환경 변화에 따른 오염 부하량 증가 시에 대비한 방안 마련이 필요하다고 사료된다.

사 사

이 논문은 2024년도 국립수산물과학원 수산시험연구사업(R2024057)의 지원으로 수행된 연구입니다.

References

- Alam MW, Qayum S, Hasan MM and Xiangmin X. 2018. Land-based marine pollution control in Bangladesh: A suggested framework with a critical analysis of national legal issues. *Indian J GeoMar Sci* 47, 1909-1917.
- APHA (American Public Health Association). 1984. *Laboratory Procedures for the Examination of Seawater and Shellfish* (5th Ed). APHA, Washington D.C., U.S.A., 1-47.
- Burak S, Doğan E and Gazioğlu C. 2004. Impact of urbanization and tourism on coastal environment. *Ocean Coast Manag* 47, 515-527. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2004.07.007>.
- Choi J, Hearne R, Lee K and Roberts D. 2015. The relation between water pollution and economic growth using the environmental Kuznets curve: A case study in South Korea. *Water Int* 40, 499-512. <https://doi.org/10.1080/02508060.2015.1036387>.
- Dias E, Ebdon J and Taylor H. 2018. The application of bacteriophages as novel indicators of viral pathogens in wastewater.

- ter treatment systems. *Water Res* 129, 172-179. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.11.022>.
- Gedik S and Mugan-Ertugral S. 2019. The effects of marine tourism on water pollution. *Fresenius Environ Bull* 28, 863-866.
- Goettert D. 2014. The Detection of the Norovirus in a Wastewater Treatment Plant as a Potential Source of Environmental Contamination. Honors Theses, Louisiana State University, Baton Rouge, LA, U.S.A.
- Graczyk TK and Schwab KJ. 2000. Foodborne infections vectored by molluscan shellfish. *Curr Gastroenterol Rep* 2, 305-309. <https://doi.org/10.1007/s11894-000-0023-y>.
- Hassard F, Sharp JH, Taft H, LeVay L, Harris JP, McDonald JE, Tuson K, Wilson J, Jones DL and Malham SK. 2017. Critical review on the Public health impact of norovirus contamination in shellfish and the environment: A UK perspective. *Food Environ Virol* 9, 123-141. <https://doi.org/10.1007/s12560-017-9279-3>.
- Hildering A, Keessen AM and Van Rijswijk HFMW. 2009. Tackling pollution of the Mediterranean Sea from land-based sources by an integrated ecosystem approach and the use of the combined international and European legal regimes. *Utrecht L Rev* 5, 80-100. <https://doi.org/10.18352/ulr.96>.
- Hong SY. 1991. Assessment of coastal zone issues in the Republic of Korea. *Coast Manag* 19, 391-415. <https://doi.org/10.1080/08920759109362151>.
- Islam MS and Tanaka M. 2004. Impacts of pollution on coastal and marine ecosystems including coastal and marine fisheries and approach for management: A review and synthesis. *Mar Pollut Bull* 48, 624-649. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2003.12.004>.
- ISO (International Organization for Standardization). 2015. Microbiology of the food chain — Horizontal method for the enumeration of beta-glucuronidase-positive *Escherichia coli*. Part 3: Detection and most probable number technique using 5-bromo-4-chloro-3-indolyl- β -D-glucuronide. In: International Standard. ISO 16649-3:2015. ISO, Geneva, Switzerland.
- ISSC (Interstate Shellfish Sanitation Conference). 2009. Method to Determine the Presence of Male Specific Coliphage in Shellfish Meats and the Microbiology. Retrieved from https://www.issc.org/sites/default/files/uploads/2009_summaryofactions/05-114.pdf on Sep 24, 2023.
- Jambeck J, Moss E, Dubey B, Arifin Z, Godfrey L, Hardesty BD, Gede Hendrawan I, Hien T, Junguo L, Matlock M, Pahl S, Raubenheimer K, Thiel M, Thompson R and Woodall L. 2020. Leveraging multi-target strategies to address plastic pollution in the context of an already stressed ocean. In: *The Blue Compendium*. Lubchenco J and Haugan PM, eds. Springer Nature, Berlin, Germany, 141-184.
- Jiang Z, Le Y, Chen M, Yang Y, Xu X, Li C, Zhang K, Zhao S and Zhou R. 2021. A modified protocol for the high yield production of a recombinant adeno-associated virus vector. *Gene Rep* 24, 101227. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.genrep.2021.101227>.
- JWSDH (Jeju Special Self-Governing Province Water Supply and Drainage Headquarters). 2020. Development of Climate Change Adaptation Measures for Public Wastewater Treatment Facilities in Jeju Special Self-Governing Province. Jeju Special Self-Governing Province, Jeju, Korea, 1-256.
- Kim CH, Ha HJ, Heo SJ, Ha HS and Lee NS. 2022. A Study on the Construction of a Mid- to Long-term Supply and Demand Forecasting Model for Cultured Seafood: Focusing on Oysters. Korea Maritime Institute Research Report, Busan, Korea, 1-134.
- Lee HS and Sobsey MD. 2011. Survival of prototype strains of somatic coliphage families in environmental waters and when exposed to UV low-pressure monochromatic radiation or heat. *Water Res* 45, 3723-3734. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.04.024>.
- Lees D. 2000. Viruses and bivalve shellfish. *Int J Food Microbiol* 59, 81-116. [https://doi.org/10.1016/s0168-1605\(00\)00248-8](https://doi.org/10.1016/s0168-1605(00)00248-8).
- McMinn BR, Ashbolt NJ and Korajkic A. 2017. Bacteriophages as indicators of faecal pollution and enteric virus removal. *Lett Appl Microbiol* 65, 11-26. <https://doi.org/10.1111/lam.12736>.
- MFDS (Ministry of Food and Drug Safety). 2017. Improvement Strategies for Safety Management in Fishery Product Growing Areas. MFDS, Cheongju, Korea, 1-199.
- MFDS (Ministry of Food and Drug Safety). 2023. Food Code. Retrieved from <https://www.law.go.kr> on Nov 28, 2023.
- MOE and KECO (Ministry of Environment and Korea Environment Corporation). 2018. Study on Efficient Wastewater Treatment Solutions During Rainfall. Retrieved from <https://www.codil.or.kr/viewDtlConRpt.do?gubun=rpt&pMetaCode=OTKCRK200791> on Mar 11, 2024.
- MOF (Ministry of Oceans and Fisheries). 2023. Sanitary Standard of Water Quality in Shellfish Growing Area. Retrieved from <https://www.law.go.kr> on Aug 18, 2023.
- NIFS (National Institute of Fisheries Science). 2022. Sanitary Survey Report for Shellfish Growing Areas in the Dosan and Pungwha Sea Areas of Gyeongnam Province. Southeast Sea Fisheries Research Institute Report, Tongyeong, Korea, 1-112.
- OSS (Our Shared Seas). 2021. How Wastewater Affects Near-shore Fisheries. Retrieved from <https://oursharedseas.com/how-wastewater-affects-nearshore-fisheries/> on Feb 01, 2024.
- Plummer JD, Long SC, Charest AJ and Roop DO. 2014. Bacterial and viral indicators of fecal contamination in drinking water. *J Am Water Works Assoc* 106, E200-E201. <https://doi.org/10.5942/jawwa.2014.106.0023>.

- Rippey SR. 1994. Infectious diseases associated with molluscan shellfish consumption. *Clin Microbiol Rev* 7, 419-425. <https://doi.org/10.1128/CMR.7.4.419>.
- Statistics Korea. 2020. Mariculture Fishing Rights. Retrieved from https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=795&tblId=DT_79501_E036&conn_path=I3 on Aug 17, 2023.
- Statistics Korea. 2021. Offshore Aquaculture Rights. Statistics Korea. Retrieved from https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=146&tblId=DT_114_2013_S0013&conn_path=I2 on Aug 17, 2023.
- Statistics Korea. 2022. Fishery Production Survey. Retrieved from https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1EW0005&conn_path=I3 on Aug 17, 2023.
- Sunlu U. 2003. Environmental impacts of tourism. In: *Local Resources and Global Trades: Environments and Agriculture in the Mediterranean Region*. Camarda D and Grassini L, eds. Ciheam, Bari, Italy, 263-270.
- Thompson JR, Marcelino LA and Polz MF. 2005. Diversity, sources, and detection of human bacterial pathogens in the marine environment. In: *Oceans and Health: Pathogens in the Marine Environment*. Belkin S and Colwell RR, eds. Springer Nature, Berlin, Germany, 29-68.
- US EPA (U.S. Environmental Protection Agency). 2013. Operating Procedure Wastewater Sampling. Retrieved from <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/Wastewater-Sampling.pdf> on Feb 26, 2024.
- US EPA (U.S. Food and Drug Administration). 2018. FDA-Korea, MOU Regarding the Safety and Quality of Fresh and Frozen Molluscan Shellfish. Retrieved from <https://www.fda.gov/international-programs/cooperative-arrangements/fda-korea-mou-regarding-safety-and-quality-fresh-and-frozen-molluscan-shellfish> on Feb 19, 2024.
- US EPA (U.S. Food and Drug Administration). 2019. National Shellfish Sanitation Program (NSSP). Guide for the Control of Molluscan Shellfish: 2019 Revision. Retrieved from <https://www.fda.gov/media/143238/download?attachment> on Feb 22, 2024.
- Wang H, Neyvaldt J, Enache L, Sikora P, Mattsson A, Johansson, A, Lindh M, Bergstedt O and Norder H. 2020. Variations among viruses in influent water and effluent water at a wastewater plant over one year as assessed by quantitative PCR and metagenomics. *Appl Environ Microbiol* 86, e02073-20. <https://doi.org/10.1128/aem.02073-20>.
- Wear SL and Thurber RV. 2015. Sewage pollution: Mitigation is key for coral reef stewardship. *Ann NY Acad Sci* 1355, 15-30. <https://doi.org/10.1111/nyas.12785>.
- WHO (World Health Organization). 2010. Safe Management of Shellfish and Harvest Waters. Rees G, Pond K, Kay D, Bartram J and Domingo JS, eds. IWA Publishing, London, U.K., 1-360.
- Xu W and Zhang Z. 2022. Impact of coastal urbanization on marine pollution: Evidence from China. *Int J Environ Res Public Health* 19, 10718. <https://doi.org/10.3390/ijerph191710718>.
- Yang M, Zhao F, Tong L, Wang S and Zhou D. 2022. Contamination, bioaccumulation mechanism, detection, and control of human norovirus in bivalve shellfish: A review. *Crit Rev Food Sci Nutr* 62, 8972-8985. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1937510>.