Korean J. Malacol. 40(4): 221-231 2024
https://doi.org/10.9710/kjm.2024.40.4.221

강우 발생에 따른 육상 오염원과 하수처리장이 여자만 해역의 해수 및 새꼬막 (*Anadara Kagoshimensis*) 에 미치는 영향 분석

이지희, 김덕훈, 홍예원, 김풍호, 유홍식[1], 최우석[2]

국립수산과학원 남해수산연구소 양식산업과, [1]국립수산과학원 식품안전가공과,
[2]국립수산과학원 남동해수산연구소

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

Jihee Lee, Deokhoon Kim, Yewon Hong, Poongho Kim, Hongsik Yu[1] and Wooseok Choi[2]

South Sea Fisheries Research Institute, National Institute of Fisheries Science, Yeosu 59780, Republic of Korea
[1]Food Safety and Processing Research Division, National Institute of Fisheries Sciences, Busan 46083, Republic of Korea
[2]Southeast Sea Fisheries Research Institute, National Institute of Fisheries Science, Tongyeong 53085, Republic of Korea

ABSTRACT

In this study, we evaluated the effect of inland pollution sources on seawater and shellfish(Ark shell) in the Yeoja bay after 20.5 and 83.3 mm rainfall events. We analyzed the sanitary indicator microorganism such as total coliform, fecal coliform *Escherichia coli* (*E. coli*) and Male-specific coliphage (MSC) in the discharge water of waste water treatment plant (WWTP), major inland pollution sources, seawater and shellfish for 4 days after rainfall events. The range of coliform group and fecal coliform was from < 1.8 to 1,600,000 and from <1.8 to 140,000 MPN/100 mL after rainfall of 20.5 mm and from < 1.8 to 330,000 and from < 1.8 to 230,000 MPN/100 mL after rainfall of 83.3 mm in the discharge water of 13 waste water treat plants. Also The range of fecal coliform and radius of impacted area of 4 contaminants (domestic waste water and stream water) was from 49 to 1,100,000 MPN/100 mL and from 4 to 1,870 m after rainfall of 20.5 mm and from 170 to 130,000 MPN/100 mL and from 58 to 1,794 m after rainfall of 83.3 mm. The fecal coliform of seawater at 21 stations ranged from < 1.8 to 540 MPN/100 mL. And the *E. coli* level of shellfish at 3 stations ranged from < 18 to 78 MPN/100 g.

Key words: Yeoja Bay, Rainfall, Ark shell, Fecal coliform, *Escherichia coli*

서 론

여자만은 우리나라 남해안의 중서부에 위치하며 전라남도 여수시 화정면 여자도를 중심으로 보성군, 순천시, 여수시, 고흥군으로 둘러싸여 있는 반폐쇄성 해역이다 (Shin *et al.*, 2016). 여자만 전체 해역 13,000 ha 중 양식어업은 약 9,200 ha의 면적에 총 820건이 허가되어 있으며, 새꼬막, 피조개, 굴, 바지락, 지중해담치 등 이매패류가 생산되고 있으며, 주 생산 품종은 새꼬막이다.

새꼬막 (*Anadara Kagoshimensis*) 은 돌조개목 (Arcida) , 돌조개과 (Arcidae) 에 속하며 한국, 일본, 중국의 얕은 연안해역의 진흙 퇴적물에 서식하는 부유섭식 이매패류이다 (Nakamura, 2005). 새꼬막과 같은 이매패류는 이동성이 거의 없고 여과섭식 (Filter feeding) 으로 바닷물을 여과하여 먹이활동을 하는 특성을 가지고 있어, 바다로 흘러 들어오는 하수 (생활하수, 농경수 등), 선박에서 배출되는 인분, 야생동

Received: December 02, 2024; Revised: December 13 2024; Accepted: December 26, 2024
Corresponding author: Wooseok Choi
Tel: +82 (55) 640-4762, e-mail: choi8244@korea.kr
1225-3480/24884
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.

물의 분변에 의한 장내 병원성 세균이나 바이러스 등의 미생물학적 위해요소를 체내에 축적할 수 있으며, 이에 오염된 패류를 섭취 시 식중독, 심한 경우 사망까지도 초래할 수 있어 전 세계적으로 식품위생상 문제가 되고 있다 (Feldhusen, 2000; Iwamoto *et al.*, 2010; Jensen, 1956; Lees, 2000; OSS, 2021; Potasman *et al.*, 2002; Rippey, 1994).

패류의 위생관리를 위해 미국, EU 등 선진국 및 우리나라는 패류위생관리 프로그램을 운영하며 생산단계에서부터 체계적인 위생관리를 위해 패류의 미생물학적 위해요소를 모니터링 하고 있다. 분변계대장균 (fecal coliform) 은 패류 생산해역에 대한 위생관리 프로그램에 인축의 분변오염 지표로 오래 전부터 사용되고 있고, 해역의 분류 기준으로 여러 나라에서 활용하고 있다 (MOF, 2024b; U.S. FDA, 2019; EU commission, 2019). 또한, 인간 분변 유래 장관계 바이러스의 오염 지표로 주목 받고 있는 Male specific coliphage (MSC) 는 처리되지 않은 폐수나 하수처리장에서 처리된 후 배출되는 방출 수 중에서 검출되며 25nm 크기 (head diameter) 의 단일 가닥 RNA 구조로 염소 소독 및 환경 스트레스에 대한 내성 정도가 노로바이러스 등 다른 장관계 바이러스와 생화학적 특성이 유사하여 간접적인 지표로 사용되고 있다 (Burkhardt *et al.*, 1992).

미국은 패류를 생산하는 해역 해수의 분변계대장균을 기준으로, EU는 패류의 *Escherichia coli*를 기준으로 해역을 등급화하고, 이에 따라 생산되는 패류를 즉시 출하 또는 정화나 가공처리 후 출하 등의 관리가 이루어지고 있다 (U.S. FDA, 2019; European Commission, 2019). 우리나라 또한, 한국패류위생계획 (Korean Shellfish Sanitation Program) 에 따라 패류생산해역을 관리하고 있으며, 미국과 EU 등의 나라와 패류위생협정을 통하여 농수산물품질관리법에 따라 '수출용패류생산지정해역' (이하 지정해역) 으로 설정된 해역에서 생산된 패류를 수출하고 있다 (MOF, 2023; MOF, 2024a).

미국의 패류위생관리프로그램 (National Shellfish Sanitation Program, NSSP) 에 따르면, 해역에 영향을 미칠 수 있는 오염원이 강우 등의 상황에 따라 부하량이 증가하거나 해역에 영향을 미치는 경우 생산 제한 및 채취를 금지할 수 있도록 규정되어 있다 (U.S. FDA, 2019). 우리나라 지정해역 7개소는 대미수출 패류에 한하여 강우량에 따른 패류 채취제한 기준이 설정되어 있으나 그 외의 패류생산해역은 기준이 설정되어 있지 않다 (MOF, 2024a). 또한, 강우가 패류생산해역의 해수 및 패류의 세균학적 수질에 미치는 영향에 대한 연구가 많이 이루어 지고 있으나 (Kim *et al.*, 2023; Lee *et al.*, 2023; shin *et al.*, 2021), 여자만 해역에 대한 연구는 이루어지고 있지 않다. 본 연구대상인 여자만 해역은 반폐쇄성 내만으로 직·간접적으로 배출되는 각종 오염물질들의 영향을 받기 쉬운 지형이며, 순천시 동천, 석현천 및 보성군 벌교천과 같은 대규모 하천에 의해 지속적으로 많은 양의 하천수가 해역으로 유입되고 있어 강우 발생 시 해역의 세균학적 수질에 영향을 줄 것으로 사료되었다.

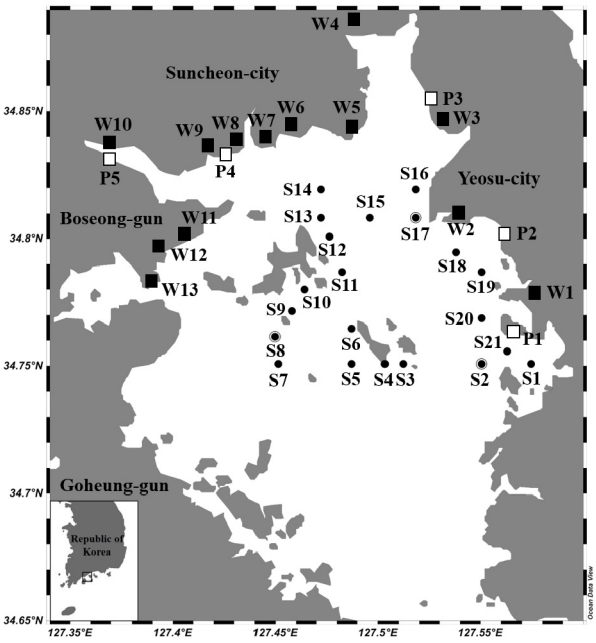

Fig. 1. Sampling station in Yeoja Bay; ● Seawater; ◉ Seawater and shellfish; □ Majour inland pollution source; ■ Waste water treatment plan.

따라서 본 연구에서는 강우 발생에 따라 육상오염원이 여자만 해역의 해수 및 패류에 미치는 영향을 파악하고, 여자만 해역에서 생산되는 패류의 채취제한 기준 마련을 위한 자료로 활용하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 조사지점 선정 및 시료채취

강우 발생에 따라 육상 오염원에 의한 미생물학적 위해요소가 여자만 해역 해수 및 패류에 미치는 영향을 평가하기 위하여 2019년에 실시한 여자만 해역 주변 육상오염원의 미생물학적 위해요소 전수조사 결과를 참고하여 방류수의 유량이 많거나 분변계대장균 오염정도가 높아 해역에 영향을 미칠 수 있는 주요 육상오염원 4개소와 여자만 배수유역에 위치한 하수처리장 13개소를 조사지점으로 선정하였고, 육상오염원의 최종방류지점 인근 및 해역에 미치는 영향을 평가할 수 있는 해수 21지점과 주요 생산품종인 새꼬막 3지점을 선정하였다 (Fig. 1).

분석시료는 2021년 3월 11일부터 12일까지 20.5 mm,

Table. 1. Medium and culture condition for Microbiological analysis

Items	Procedure	Medium and Temp.	Reference
Total coliform	Presumptive test	Lauryl Tryptose Broth (Merck, USA) (35 ± 0.5) ℃ (24 ± 2) and (48 ± 3) hr	APHA, 1970
	Confirmed test	Brilliant Green Bile Lactose broth (Merck, USA) (35 ± 0.5) ℃ (24 ± 2) and (48 ± 3) hr	
Fecal coliform	Presumptive test	Lauryl Tryptose Broth (Merck, USA) (35 ± 0.5) ℃ (24 ± 2) and (48 ± 3) hr	APHA, 1970
	Confirmed test	EC broth (Difco, USA) (44.5 ± 0.2) ℃ (24 ± 2) hr	
E. coli	Presumptive test	Mineral modified glutamate medium (Oxoid, UK) (37 ± 1) ℃ (24 ± 2) hr	ISO/TS 16649-3:2015
	Confirmed test	Tryptone bile glucuronide agar (Oxoid, UK) (44 ± 1) ℃ (22 ± 2) hr	
MSC	Mixed tryptone agar (with yeast extract, glucose, NaCl, $CaCl_2$ agar) (36.5 ± 2) ℃ (24 ± 2) hr		APHA, 2015

Table. 2. Method of calculating the impact range of pollutants

Items	Calculation
Determine loading (MPN/day)	Concentration of fecal coliform (MPN/100 mL) ×Conversion (Liter to milliliter; 1,000 mL/L) × Conversion (Min per day; 1,440 min/day) × Flow (L/min)
Dilution water required (m3/day)	Determine loading (MPN/day) / [Standard (14 MPN/100 mL) × Conversion (Milliliter to m^3; 100,000 mL/m^3)]
Area required (m2/day)	Dilution water required (m^3/day) / Average depth (m)
Radius of half-circle (m)	Area required (m^2/day) × 2 / 3.14

2022년 4월 25일부터 26일까지 83.3 mm의 강우 발생 후를 기준으로 4일간 (24시간, 48시간, 72시간 및 96시간) 채취하였다. 해수 및 육상오염원 시료는 멸균처리된 용기에 채수하였고, 패류는 멸균처리된 Whril-Pak (Nasco, Janesville, WI, USA) 에 보관하였으며 모든 시료는 저온 (10℃ 이하) 로 실험실까지 운반하였고, 24시간 내에 시료를 분석하였다.

2. 미생물학적 위해요소 분석

시료의 대장균군 (Total coliform), 분변계대장균 (Fecal coliform) 분석은 Recommended Procedures for the Sea Water and Shellfish (APHA, 1970), 대장균 (*Escherichia coli*) 분석은 ISO 16649-3 (2015) 의 방법에 따라 분석하였고, 최확수법 (Most Probable Number, MPN) 으로 나타내었다. Male-specific coliphage (MSC) 의 분석은 Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2015) 에 따라 double-agar-layer method로 분석하여 PFU (plaque-forming unit) 으로 나타내었고, MSC의 숙주세포로 *Escherichia coli* strain HS (pFamp) R (ATCC 700891) 을 사용하였다 (Table 1).

3. 주요 육상오염원이 해역에 미치는 영향평가

여자만 해역 주변 주요 육상오염원이 해역에 미치는 영향을 평가하기 위해 주요 육상오염원 배출수의 유량 측정 및 영향범위를 산출하였다. 유량측정은 유속계 (Hach FH950; Hach, Loveland, Co, USA) 를 사용하여 유속을 측정한 후 유속-면적법 (Velocity-Area Method) 을 이용하여 유량을 산출하였다. 여자만 해역 주변 주요 육상오염원의 영향범위는 미국 Food and Drug Administration (FDA) 에서 제시한 오염원 평가방법에 준하여 Table 2의 식을 사용하여 계산하였다 (Park *et al.*, 2012). 즉, 각각의 주요 육상오염원 배출수에서 검출된 분변계대장균의 농도를 곱하여 여자만 해역으로 유입되는 일일 부하량 (Determine loading, MPN/day) 을 계산한 후, 미국의 허가해역 수질 기준인 14 MPN/100 mL 이하로 희석시킬 수 있는 해수의 양 (Dilution water required) 을 계산하였다. 그리고 여자만 해역의 수심을 고려하여 위 해수의 양을 포함하는 구역의 면적 (Area required) 및 반경 (Radius of half-circle) 을 산출하였고, 조사지점과의 거리를 확인하여 오염원이 해역에 미치는 영향을 평가하였다.

Table. 3. Result of bacteriological analysis for waste water treatment plant samples in the drainage basin of Yeoja Bay area after 20.5 mm rainfall event

Station	Day after Rainfall	Total coliform (MPN[1)]/100 mL)	Fecal coliform (MPN/100 mL)	*E. coli* (MPN/100 mL)	MSC (PFU[2)]/100 mL)
W1	1	13	< 1.8	< 1.8	< 10
	2	23	< 1.8	< 1.8	< 10
	3	33	4.0	4.0	< 10
	4	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 10
W2	1	23	< 1.8	< 1.8	10
	2	23	< 1.8	< 1.8	< 10
	3	8	< 1.8	< 1.8	< 10
	4	11	4.5	4.5	< 10
W3	1	-[3)]	-	-	-
	2	7,000	400	400	< 10
	3	54,000	330	330	< 10
	4	17,000	1,700	1,700	< 10
W4	1	330,000	33,000	33,000	2,600
	2	92,000	35,000	35,000	1,400
	3	540,000	130,000	130,000	1,200
	4	110,000	33,000	33,000	1,200
W5	1	13,000	33	1,700	< 10
	2	17,000	7,900	7,900	20
	3	13,000	1,300	1,300	20
	4	790	2.0	2.0	20
W6	1	11,000	490	490	70
	2	7,900	1,100	1,100	360
	3	92,000	1,300	790	2,300
	4	490	170	70	2,300
W7	1	240	240	240	20
	2	54,000	35,000	35,000	< 10
	3	35,000	7,900	7,900	20
	4	2,300	1,300	1,300	20
W8	1	35,000	35,000	11,000	60
	2	23,000	7,900	7,900	130
	3	13,000	13,000	13,000	30
	4	7,900	490	490	30
W9	1	7,000	490	490	20
	2	2,300	230	230	< 10
	3	3,500	170	110	30
	4	3,500	3,500	3,500	30
W10	1	160,000	24,000	24,000	1,400
	2	1,600,000	140,000	110,000	2,900
	3	350,000	49,000	49,000	190
	4	79,000	17,000	17,000	1,900
W11	1	-	-	-	-
	2	-	-	-	-
	3	-	-	-	-
	4	-	-	-	-
W12	1	-	-	-	-
	2	-	-	-	-
	3	-	-	-	-
	4	-	-	-	-
W13	1	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 10
	2	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 10
	3	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 10
	4	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 10

[1)]MPN, Most probable number, [2)]PFU, Plaque forming unit, [3)]-, No sample

Table. 4. Result of bacteriological analysis for waste water treatment plant samples in the drainage basin of Yeoja Bay area after 83.3 mm rainfall event

Station	Day after Rainfall	Total coliform (MPN[1]/100 mL)	Fecal coliform (MPN/100 mL)	*E. coli* (MPN/100 mL)	MSC (PFU[2]/100 mL)
W1	1	4,900	3,300	3,300	70
	2	11,000	2,200	1,700	90
	3	4,900	1,300	790	< 10
	4	35,000	7,900	2,800	680
W2	1	4,900	790	790	50
	2	4,900	1,300	790	< 10
	3	4,900	1,100	700	30
	4	24,000	3,300	3,300	650
W3	1	17,000	1,700	1,700	< 10
	2	330,000	170,000	170,000	2,300
	3	7,900	3,300	3,300	< 10
	4	-[3]	-	-	-
W4	1	92,000	7,000	7,000	120
	2	35,000	35,000	35,000	30
	3	92,000	17,000	11,000	< 10
	4	160,000	35,000	35,000	230
W5	1	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 10
	2	54,000	17,000	17,000	1,400
	3	4,600	3,300	1,700	< 10
	4	4.5	< 1.8	< 1.8	< 10
W6	1	330	23	23	750
	2	230,000	230,000	230,000	3,600
	3	3,300	2,300	2,300	< 10
	4	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 10
W7	1	2.0	< 1.8	< 1.8	490
	2	330,000	130,000	130,000	1,600
	3	4,900	2,300	2,300	< 10
	4	330	2.0	< 1.8	< 10
W8	1	790	330	330	5,500
	2	220,000	170,000	170,000	1,300
	3	790	490	330	<10
	4	<1.8	<1.8	<1.8	<10
W9	1	13	< 1.8	< 1.8	< 10
	2	43,000	14,000	14,000	1,600
	3	2,300	1,300	1,300	< 10
	4	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 10
W10	1	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 10
	2	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 10
	3	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 10
	4	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 10
W11	1	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 10
	2	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 10
	3	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 10
	4	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 10
W12	1	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 10
	2	4.0	< 1.8	< 1.8	< 10
	3	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 10
	4	6.1	< 1.8	< 1.8	< 10
W13	1	7,900	3,300	3,300	10
	2	-	-	-	-
	3	35,000	7,900	7,900	1,200
	4	54,000	17,000	17,000	1,200

[1]MPN, Most probable number, [2]PFU, Plaque forming unit, [3]-, No sample

Table. 5. Result of bacteriological analysis for major inland pollution source samples in the drainage basin of Yeoja Bay area after 20.5 and 83.3 mm rainfall event

Station	Rainfall (mm)	Day after Rainfall	Total coliform (MPN[1]/100 mL)	Fecal coliform (MPN/100 mL)	*E. coli* (MPN/100 mL)	MSC (PFU[2]/100 mL)
P1 (DW[3])	20.5	1	920,000	170,000	17,000	< 10
		2	3,500,000	790,000	790,000	< 10
		3	350,000	920,000	79,000	< 10
		4	1,100,000	1,100,000	1,100,000	< 10
	83.3	1	490,000	130,000	23,000	< 10
		2	330,000	33,000	23,000	< 10
		3	490,000	23,000	23,000	< 10
		4	330,000	33,000	33,000	< 10
P2 (DW)	20.5	1	13,000	790	790	170
		2	14,000	790	790	80
		3	3,500	490	490	< 10
		4	13,000	490	490	90
	83.3	1	240,000	33,000	33,000	1,900
		2	79,000	7,000	4,900	550
		3	14,000	4,900	4,900	920
P3 (DW)	20.5	4	23,000	4,900	4,900	230
		1	1,300	170	78	30
		2	790	130	49	< 10
		3	3,500	790	230	30
		4	490	490	330	30
	83.3	1	490,000	13,000	13,000	12,000
		2	-[5]	-	-	-
		3	-	-	-	-
		4	-	-	-	-
P4 (SW[4])	20.5	1	11,000	490	330	210
		2	1,300	78	78	<10
		3	9,200	5,400	130	<10
		4	460	49	33	<10
	83.3	1	11,000	230	230	30
		2	2,200	230	230	20
		3	13,000	170	170	< 10
		4	13,000	3,300	1,700	1,200

[1]MPN, Most probable number; [2]PFU, Plaque forming unit; [3]DW, Domestic waste water; [4]SW, Stream water; [5]-, There was no flow of inland pollution source

결과 및 고찰

1. 강우 발생 후 육상오염원이 해역에 미치는 영향평가

강우 발생에 따른 육상오염원이 여자만 해역에 미치는 영향을 평가하기 위하여 20.5 mm 및 83.3 mm의 강우가 발생한 후 4일동안 여자만 배수유역에 분포한 하수처리시설, 주요 하천 및 생활하수 배출수의 대장균군, 분변계대장균, *E. coli*, MSC의 변화를 분석하였다.

여자만 배수유역에 위치한 13개 하수처리시설 방류수에 대해 20.5 mm의 강우 발생 후 4일간 대장균군, 분변계대장균, *E. coli*, MSC를 분석한 결과, < 1.8-1,600,000, < 1.8-140,000, < 1.8-130,000 MPN/100 mL 및 <1 0-2,900 PFU/100 mL로 검출되었다 (Table 3). 또한, 83.3 mm의 강우 발생 후 4일간 대장균군, 분변계대장균, *E. coli*, MSC를 분석한 결과, < 1.8-330,000, < 1.8-230,000, < 1.8-230,000 MPN/100 mL 및 < 10-5,500 PFU/100 mL로 검출되었다 (Table 4).

20.5 mm의 강우 후 W4 하수처리장에서 1일차에 대장균군이 높게 검출되었다가 2일차에 감소하는 경향을 보였고, 3일차에 다시 높게 검출되었다가 4일차에 감소하는 경향을 보였다. 또한, W10 하수처리장에서 2일차에 대장균군이 높게 검출되었으나 점차 감소하는 경향을 나타냈다.

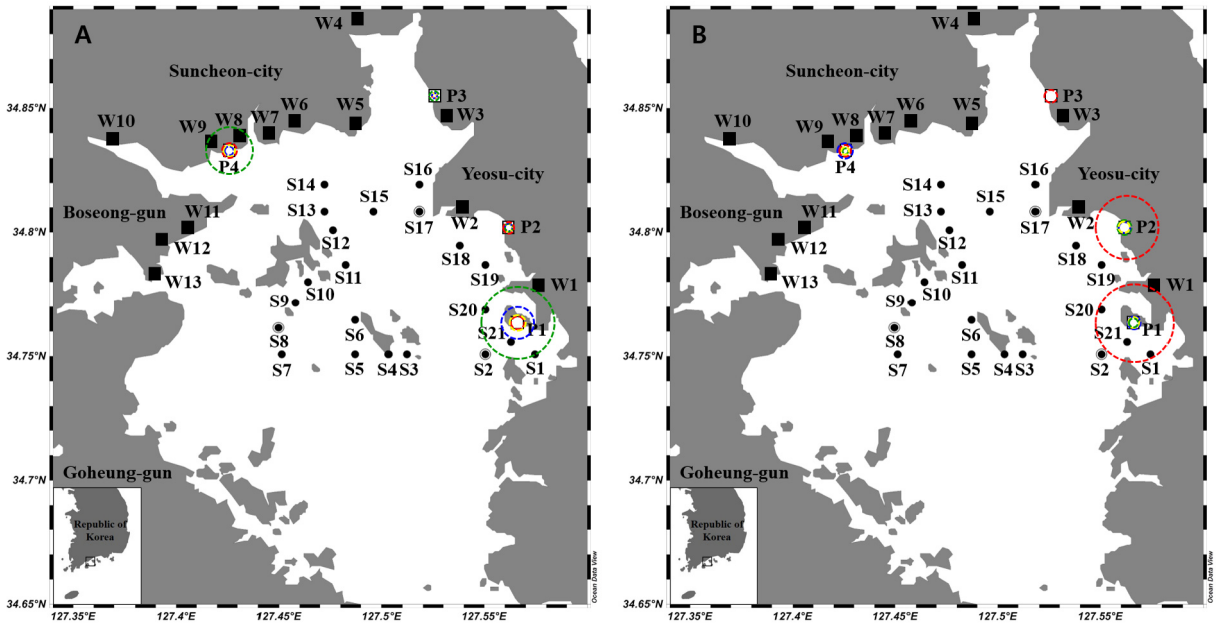

Fig. 2. The estimated diffusion range of the contaminants to coastal area in Yeoja by after rainfall; **A**, After 20.5 mm rainfall in 2021; **B**, After 83.3 mm rainfall in 2022; Redcircle, Day 1; Yellow circle, Day 2; Green circle, Day 3; Blue circle, Day 4.

83.3 mm의 강우 후 W3, W6, W7, W8 및 W9 하수처리장에서 2일차에 대장균군이 높게 검출되었다가 점차 감소하는 경향을 보였으며, 이는 강우에 의한 하수의 다량유입으로 인한 일시적인 결과로 사료된다.

20.5 mm 강우 발생 후 4일 동안 4개소의 주요 육상오염원 배출수에서 대장균, 분변계대장균, *E. coli*, MSC의 농도는 각각 460-3,500,000, 49-1,100,000, 33-1,100,000 MPN/100 mL 및 < 10-210 PFU/100 mL로 검출되었고 해역에 미치는 영향반경은 4-1,870 m로 계산되었으며 P1 및 P4 지점의 영향반경이 강우 후 3일차에 1.5 km 이상으로 가장 큰 것으로 확인되었다. P1의 유량은 적지만, 분변계대장균의 농도가 높게 검출되었고, P4는 분변계대장균 농도가 높진 않으나 유량이 많아 해역에 영향을 미치는 것으로 확인되었다. P2 및 P3은 유량 및 검출된 분변계대장균 등의 농도가 높지 않아 해역에는 영향을 거의 미치지 않는 것으로 확인되었다 (Table 5, 6, Fig 2).

83.3 mm 강우 발생 후 4일 동안 4개소의 주요 육상오염원 배출수에서 대장균군, 분변계대장균, *E. coli*, MSC의 농도는 각각 2,200-490,000, 170-130,000, 170-33,000 MPN/100 mL 및 < 10-12,000 PFU/100 mL로 검출되었고 해역에 미치는 영향반경은 58-1,794 m로 계산되었으며 P1 및 P2 지점의 영향반경이 강우 후 1일차에 1 km 이상으로 가장 큰 것으로 확인되었고, 유량 및 분변계대장균 농도가 높게 검출되었다가 회복되는 것을 확인하였다. P3 지점은 유량이 적었지만 분변계대장균 농도가 비교적 높게 검출되었고, P4 지점은 유량 및 분변계대장균 농도가 감소하다가 강우 후 4일차에 유량 및 분변계대장균이 높게 검출되었으나 해역에 미치는 영향은 크지 않았다 (Table 5, 6, Fig 2).

2. 강우 발생 후 해수의 위생상태 변화

20.5 및 83.3 mm의 강우 발생 후 4일 동안 해수의 분변계대장균 농도를 Table 7에 나타내었다. 20.5 mm 강우 발생 후 4일 동안 여자만 해역에서 채취한 해수의 분변계대장균 농도는 강우 1일, 2일, 3일 및 4일 후 각각 < 1.8-2.0, < 1.8-2.0, < 1.8-4.5 및 < 1.8-2.0 MPN/100 mL으로 확인되었다. 해양수산부고시 제2024-58호에 따르면 우리나라의 경우, 모든 조사정점이 분변계대장균의 기하학적 평균치가 14 MPN/100 mL 미만일 경우 지정해역 수준으로 분류하고 있으며 미국의 경우, 자국의 패류 위생관리 프로그램 (NSSP) 에 따라 30회 이상의 해역에 대한 조사를 수행하고 조사정점의 분변계대장균 기하학적 평균치가 14 MPN/100 mL 미만이고 90th percentile 값이 43 MPN/100 mL 미만일 경우 즉시 출하가 가능한 허가해역으로 분류한다 (MOF, 2024; U.S. FDA, 2019). 본 연구에서는 20.5 mm의 강우가 발생했을 때, 여자만 해역의 해수 조사지점은 우리나라 및 미국의 지정해역 및 허가해역 수준에 해당하는 것으로 확인되었다.

83.3 mm 강우 발생 후 4일 동안 여자만 해역에서 채취한 해수의 분변계대장균 농도는 강우 1일, 2일, 3일 및 4일 후 각각 < 1.8-540, < 1.8-220, < 1.8-7.8 및 < 1.8-17 MPN/100 mL으로 확인되었다. 강우 발생 후 1일차에 해역의 북측 조사

Table. 6. The calculated impacted area on major inland pollution source samples in the drainage basin of Yeoja Bay area after rainfall event

Station	Rainfall (mm)	Day after Rainfall	Flow rate (L/min)	Fecal coliform (MPN/100 mL)	Determine loading (MPN/day)	Dilution water required (m^3)	Area required (m^2)	Radius of half-circle (m)
P1	20.5	1	6.9	170,000	1.68×10^{10}	1.20×10^{5}	1.20×10^{5}	276
		2	3.8	790,000	4.27×10^{10}	3.05×10^{5}	1.52×10^{5}	312
		3	21.0	920,000	2.78×10^{11}	1.99×10^{6}	9.94×10^{6}	1,591
		4	5.0	1,100,000	7.92×10^{10}	5.66×10^{5}	1.13×10^{5}	849
	83.3	1	377.9	130,000	7.07×10^{11}	5.05×10^{6}	5.05×10^{6}	1,794
		2	15.0	33,000	7.13×10^{9}	5.09×10^{4}	5.09×10^{4}	180
		3	8.8	23,000	2.91×10^{9}	2.08×10^{4}	4.15×10^{4}	163
		4	15.0	33,000	7.13×10^{9}	5.09×10^{4}	1.02×10^{4}	255
P2	20.5	1	108.0	790	1.23×10^{9}	8.78×10^{3}	8.78×10^{3}	75
		2	24.0	790	2.73×10^{8}	1.95×10^{3}	1.95×10^{3}	35
		3	86.0	490	6.07×10^{8}	4.33×10^{3}	2.17×10^{3}	37
		4	37.5	490	2.65×10^{8}	1.89×10^{3}	1.89×10^{3}	35
	83.3	1	630.0	33,000	2.99×10^{11}	2.14×10^{6}	2.14×10^{6}	1,167
		2	240.0	7,000	2.42×10^{10}	1.73×10^{5}	1.73×10^{5}	332
		3	255.0	4,900	1.80×10^{10}	1.29×10^{5}	2.57×10^{5}	405
		4	645.0	4,900	4.55×10^{10}	3.25×10^{5}	1.63×10^{5}	322
P3	20.5	1	0.7	170	1.63×10^{6}	1.16×10^{1}	2.91×10^{1}	4
		2	0.9	130	1.68×10^{6}	1.20×10^{1}	3.01×10^{1}	4
		3	4.0	790	4.55×10^{7}	3.25×10^{2}	1.63×10^{3}	32
		4	0.6	490	4.23×10^{6}	3.02×10^{1}	1.51×10^{2}	10
	83.3	1	0.8	13,000	1.50×10^{8}	1.07×10^{3}	5.35×10^{3}	58
		2	-*	-	-	-	-	-
		3	-	-	-	-	-	-
		4	-	-	-	-	-	-
P4	20.5	1	12,408	490	8.76×10^{10}	6.25×10^{5}	2.64×10^{5}	410
		2	4,188	78	4.70×10^{9}	3.36×10^{4}	1.12×10^{5}	267
		3	4,944	5,400	3.84×10^{11}	2.75×10^{6}	5.49×10^{6}	1,870
		4	3,820	49	2.70×10^{9}	1.93×10^{4}	3.85×10^{4}	157
	83.3	1	4,878	230	1.62×10^{10}	1.15×10^{5}	5.77×10^{4}	192
		2	2,670	230	8.84×10^{9}	6.32×10^{4}	1.93×10^{4}	111
		3	1,722	170	4.22×10^{9}	3.01×10^{4}	8.20×10^{3}	72
		4	4,554	3,300	2.16×10^{11}	1.55×10^{6}	5.73×10^{5}	604

* There was no flow of inland pollution source

지점에 위치한 S15 지점의 분변계대장균 농도가 540 MPN/100 mL로 높게 검출이 되었으나, 2일차부터 오염도가 감소하여 4일차에 < 1.8 MPN/100 mL의 농도로 확인되었다. 강우 발생 후 2일차에 해역의 북측 조사지점 S16 및 S3, S5 및 S6 지점에서 분변계대장균 농도가 49-220 MPN/100 mL로 높게 검출되었으나, 오염도가 점차 감소하여 3일차에 분변계대장균 농도 < 1.8-2.0 MPN/100 mL, 4일차에 < 1.8 MPN/100 mL로 회복되는 것을 확인하였다.

3. 강우 발생 후 패류 (새꼬막) 의 위생상태 변화

강우 발생으로 인해 오염도가 증가된 해수가 여자만 해역의 패류에 미치는 영향을 확인하기 위해 육상 오염원과 인접하여 영향을 받을 것으로 판단되는 3개의 패류 조사지점을 설정하여 조사를 수행하였다.

20.5 및 83.3 mm의 강우 발생 후 4일 동안 패류의 *E. coli* 농도는 각각 < 18-78 및 < 18-20 MPN/100 g으로 확인되었다 (Table 8). EU의 규정에 따르면, 해역에서 수확한 패

Table. 7. Result of Fecal coliform analysis for seawater samples in the Yeoja bay under the wet condition

Station	Fecal coliform (MPN/100 mL)							
	Day after 20.5 mm				Day after 83.3 mm			
	1	2	3	4	1	2	3	4
S1	< 1.8	< 1.8	1.8	< 1.8	2.0	7.8	< 1.8	17
S2	< 1.8	< 1.8	4.5	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8
S3	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	2.0	79	< 1.8	< 1.8
S4	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8
S5	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	2.0	49	< 1.8	< 1.8
S6	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	49	1.8	< 1.8
S7	< 1.8	< 1.8	< 1.8	2.0	< 1.8	4.5	< 1.8	< 1.8
S8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8
S9	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	2.0	< 1.8	< 1.8	< 1.8
S10	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8
S11	< 1.8	< 1.8	2.0	< 1.8	2.0	17	< 1.8	2.0
S12	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8
S13	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	4.5	4.5	< 1.8	< 1.8
S14	2.0	< 1.8	1.8	< 1.8	< 1.8	1.8	< 1.8	2.0
S15	< 1.8	2.0	< 1.8	< 1.8	540	7.8	2.0	< 1.8
S16	< 1.8	< 1.8	< 1.8	2.0	23	220	2.0	< 1.8
S17	2.0	< 1.8	< 1.8	< 1.8	2.0	11	4.5	< 1.8
S18	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	2.0	11	7.8	< 1.8
S19	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	1.8	2.0	< 1.8	< 1.8
S20	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	1.8	< 1.8	< 1.8
S21	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	2.0	< 1.8	2.0
Range	< 1.8-2.0	< 1.8-2.0	< 1.8-4.5	< 1.8-2.0	< 1.8-540	< 1.8-220	< 1.8-7.8	< 1.8-17

Table. 8. Result of E. colianalysis for shellfish(Ark shell) samples in the Yeoja bay under the wet condition

Station	*E. coli* (MPN/100 mL)							
	Day after 20.5 mm				Day after 83.3 mm			
	1	2	3	4	1	2	3	4
S2	78	20	< 18	< 18	< 18	20	-	< 18
S8	45	< 18	< 18	< 18	< 18	< 18	20	< 18
S17	-	-	-	-	-	-	< 18	< 18
Range	45-78	< 18-20	< 18-< 18	< 18-< 18	< 18-< 18	< 18-20	< 18-20	< 18-< 18

류에 대해 30회 이상의 조사 결과 모든 시료에서의 *E. coli* 농도가 700 MPN/100 g 이하이고, 시료수의 80%가 230 MPN/100 g 이하일 경우 신선, 냉동 상태로 시장에 출하할 수 있는 A등급 해역으로 분류하고 있다.

20.5 mm의 강우 후, 여자만 해역에서 채취한 패류의 *E. coli* 농도는 1일 후, 2일 후, 3일 후 및 4일 후에 각각 45-78, < 18-20, < 18-18 및 < 18-18 MPN/100 g으로 모든 패류 조사정점의 *E. coli* 농도가 230 MPN/100 g을 초과하지 않아 EU의 패류 안전성 수준을 만족하는 것으로 확인되었다. 1일차에 45-78 MPN/100 g으로 비교적 높게 검출되었으나, 2일차부터 *E. coli* 오염도가 점차 감소하여 3일차부터는 모든 시료에서 < 18 MPN/100 g으로 회복되는 것을 확인하였다.

83.3 mm의 강우 후, 여자만 해역에서 채취한 패류의 *E. coli* 농도는 1일 후, 2일 후, 3일 후 및 4일 후에 각각 < 18-< 18, < 18-20, < 18-20 및 < 18-< 18 MPN/100 g으로 모든 패류 조사정점의 *E. coli* 농도가 230 MPN/100 g을 초과하지 않아 EU의 패류 안전성 수준을 만족하는 것으로 확인되었다. 2일 및 3일차에 < 18-20 MPN/100 g으로 검출되었으나 4일차부터 모든 시료에서 < 18 MPN/100 g으로 회복되는 것을 확인하였다.

여자만 해역에 20.5 mm의 강우가 발생했을 때, 하수처리장 배출수의 대장균군 농도가 점차 감소하였고, 일부 주요 육상오염원의 분변계대장균 오염도가 증가하고, 유량이 많아져 해역에 영향을 미치는 것으로 확인되었으나 그 영향반경이 점차 감소하는 것을 확인하였다. 해수의 미생물학적 안전성에 거의 영향을 받지 않는 것으로 확인되었으나, 패류의 경우 1일차에 검출된 대장균이 점차 감소하는 것을 확인하였다.

83.3 mm의 강우가 발생했을 때, 하수처리장 배출수의 대장균군 농도가 점차 감소하였지만 일부 조사지점에서는 높아지는 경향이 있었다. 주요 육상오염원의 분변계대장균 오염도는 1일차에 높게 검출되고 해역에 미치는 영향도 컸으나 시간이 지날수록 점차 감소하였다. 해수의 경우 1, 2일차에 높게 검출되었다가 3, 4일차에 < 1.8 MPN/100 mL 수준으로 감소하였고, 패류의 경우 2, 3일차에 대장균이 검출되었으나 4일차에 < 18 MPN/100 g 수준으로 감소하였다.

여자만 해역에서는 새꼬막 이외에도 피조개, 바지락, 굴, 지중해담치와 같은 여과섭식성 이매패류가 생산되기 때문에, 패류의 미생물학적 안전성을 확보하기 위해서는 하수처리장의 확충 및 가정집 정화조의 지속적인 수거 및 관리 등을 통해 해역에 영향을 미치는 육상오염원의 관리 및 오염원 모니터링이 필요할 것으로 판단된다.

요 약

본 연구에서는 여자만 해역에 강우가 발생했을 때, 오염원이 해역에 미치는 영향을 파악하고 해수와 패류의 미생물학적 위생상태를 평가하여 여자만 해역에서 생산되는 패류의 채취 제한 기준 설정을 위한 기초자료를 확보하고자 하였다.

여자만 배수유역에 위치한 주요 육상오염원 중 하수처리시설은 13개소로 20.5 및 83.3 mm의 강우 발생 후 4일간 배출수에서 검출된 분변계대장균은 < 1.8-140,000 및 < 1.8-230,000 MPN/100 mL으로 일부 하수처리장 배출수에서 높게 검출되었으나 점차 감소하는 경향을 보였다. 또한, 생활하수 및 하천수 4개 배출수에서 검출된 분변계대장균의 농도와 영향반경은 49-1,100,000 MPN/100 mL 및 4-1,870 m로 확인되었고, 20.5 mm 및 83.3 mm의 강우에 일부 오염원이 해역까지 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

여자만 해역의 21개의 해수 조사지점에서 검출된 분변계대장균의 농도는 < 1.8-540 MPN/100 mL으로, 83.3 mm의 강우에 여자만 북부에 위치한 오염원들에 의해 오염부하량이 증가하여 일부 조사지점의 농도가 높게 검출되었으나 점차 감소하여 4일차에 < 1.8 MPN/100 mL로 확인되었다.

3개의 패류 조사지점에서 검출된 *E. coli*의 농도는 < 18-78 MPN/100 g으로 확인되었으며, 20.5 mm의 강우 후 1일차에 높게 검출되었으나 점차 감소하여 3일차에 < 18 MPN/100 g으로 확인되었다.

본 연구 결과를 바탕으로, 여자만 해역에 20.5 및 83.3 mm의 강우가 발생했을 때, 해역 주변 일부 오염원이 해역에 미치는 영향이 있으며, 패류에도 2일 (20.5 mm) 및 3일 (83.3 mm) 간 영향을 미치나, 오염도가 점차 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 향후 강우량을 보다 더 세분화하여 연구가 수행될 필요가 있고, 내수용 패류생산해역의 안전성을 위해 패류 채취 제한 기준이 설정되어야 할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 2024년도 국립수산과학원 수산과학연구사업 (R2024057)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

APHA. (1970) Recommended procedures for the examination of seawater and shellfish. Forth Edition. pp. 1-47. American Public Health Association. Washington.

APHA. (2015) Standard methods for the examination of water and wastewater Twenty-third Edition. American Public Health Association. Washington.

Burkhardt, W 3rd., Watkins, W.D. and Rippey, S.R. (1992) Survival and replication of male=specific bacteriophages in molluscan shellfish. *Appl Environ Microbiol.*, **58**: 1371-1373.

European Commission. (2019) Commission Regulation (EU) 2019/627 amending Annex II to Regulation (EC) No 2017/625 of the European parliament and of the council laying down specific rules for the organization of official controls on products of animal origin intended for human consumption as regards certain requirements for live bivalve molluscs, echinoderms, tunicates and marine gastropods and Annex I to Regulation (EC) No 2074/2005 on microbiological criteria for foodstuffs. Official Journal of the European Union.

Feldhusen, F. (2000) The role of seafood in bacterial foodborne diaseas. *Microbes Infect.*, **2**: 1651-1660.

ISO. (2015) Microbiology of the food chain-

Horizontalmethod for the enumeration of betagluccuronidasepositive *Escherichia coli* Part 3: Detection and most probable number technique using 5-bromo-4-chloro-3-indoly-β-D-glucuronide. International Organization for Standardization. 16649-3.

Iwamoto, M., Ayers, T., Mahon, BE. and Swerdlow, DL. (2010) Epidemilogy of seafood-associated infections in the United States, *Clinical Microbiology Reviews.*, **23**(2): 399-411. Retrieved from https://doi.org/10.1128/CMR.00059-09.

Jensen, E.T. (1956) Shellfish and public health. *Journal of Milk and Food Techchnology.*, **19**: 281-283.

Kim, J.H., Yoon, M.C., Cho, S.R., Lee, J.W., Jung, S.H., Nam, K.H., Ha, K.S. and Park, K.B.W. (2023) Evaluation of the Effect of the Inland Pollution Source on Seawater and Shellfish after Rainfall in the Goseong Bay, Korea. *Korean Journal of Malacology.*, **39**(3): 89-101.

Lees, D. (2000) Viruses and bivalve shellfish. *International Journal of Food Microbiology.*, **59**: 81-116.

Lee, J.W., Yoon, M.C., Kim, J.H., Jo, S.R., Nam, K.H., Ha, K.S. and Park, K.B.W. (2023) Impact of Land-based Pollution Sources on Seawater and Shellfish after Rainfall Event in the Jindongman Area. *Journal of Fisheries and Aquatic Sciences.*, **56**(6): 798-809.

MOF. (2023) Korean Shellfish Sanitation Program. pp.1-121. Ministry of Oceans and Fisheries, Sejong. Retrieved from http://www.mof.go.kr on April 4.

MOF. (2024a) Designation of the shellfish growing area for export. Article 2021-36. Ministry of Oceans and Fisheries, Sejong. Retrieved from http://www.law.go.kr November 27.

MOF. (2024b) Sanitary Standard of Water Quality in Shellfish Growing Area. Retrieved from http://www.law.go.kr on November 27.

Nakamura, Y. (2005) Suspension feeding of the ark shell *Scapharca subcrenata* as a function of environmental and biological variables. *Fisheries Sciences.*, **71**: 875-883.

OSS(Our Shared Sea). (2021) How Wastewater Affects Nearshore Fisheries. Retrieved from https://oursharedseas.com/how-wastewater-affects-nearshore-fisheries/ on Dec 17, 2024

Park, K. B. W., Jo, M. R., Kim, Y. K., Lee, H. J., Kwon, J. Y., Son, K. T. and Lee, T. S. (2012) Evaluation of the Effects of the Inland Pollution Sources after Rainfall Events on the Bacteriological Water Quality in Narodo area, Korea. Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences., 45(5):414-422.

Potasman, I., Paz, A and Odeh, M. (2002) Infectious outbreaks associated with bivalve shellfish consumption: A worldwide perspective. Clin Infect Dis., 35: 921-928.

Rippey, S.R. (1994) Infectious diseases associated with molluscan shellfish consumption. Clin Microbiol Rev., 7: 419-425.

Shin, S. B., Oh, E. G., Jeong, S. H., Lee, H. J., Kim, Y. G. and Lee, T. S. (2016) Assessment of Bacteriological Safety of the Seawater and Ark shell (*Scapharca subcrenata*) in Yeoja Bay, Korea. *Journal of Fishier and Marin Educational Research*, **28**(5): 1435-1443.

Shin, S.B., Choi, W.S., Lee, J.H. and Lim, C.W. (2021) Evaluation of the Effect of the Inland Pollution Source on Seawater and Oyster (*Crassostrea gigas*) after Rainfall in the Kamak Bay, Korea. *Korean Journal of Malacology.*, **37**(3): 113-123.

U.S. FDA (2019) National Shellfish Sanitation Program, Guide for the control of molluscan shellfish. U.S. Food and Drug Administration, Silver Spring. Retrieved from http://www.fda.gov/Food/GuidanceRegulation/FederalStateFoodPrograms/ucm2006754.htm.