

강우 발생에 따른 육상오염원이 나로도 해역의 해수 및 바지락 (*Ruditapes philippinarum*)에 미치는 영향분석

김덕훈, 이지희, 최우석¹, 조성래, 정연겸, 유흥식

국립수산과학원 남해수산연구소, ¹국립수산과학원 남동해수산연구소

Evaluation of the Impact of Inland Pollution Source on Seawater and Short neck clam (*Ruditapes philippinarum*) after Rainfall in the Narodo Area, Korea

Deok Hoon Kim, Ji hee Lee, Woo seok Choi¹, Sung Rae Cho, Yeon Gyeom Jeong and Hong Sik Yu

South Sea Fisheries Research Institute, National Institute of Fisheries Science, Yeosu 59780, Korea

¹Southeast Sea Fisheries Research Institute, National Institute of Fisheries Science, Tongyeong 53085, Korea

ABSTRACT

In this study, we evaluated the impact of inland pollution sources on the sanitary status of seawater and shellfish (Short neck Clam) in the Narodo Area after 33.0 mm and 116.1 mm rainfall events. We analyzed the sanitary indicator microorganism such as coliform group, fecal coliform, *Escherichia coli* (*E. coli*) and Male-specific coliphage (MSC) in the discharge waters from the waste water treatment plants (WWTPs) and major inland pollution sources and also in seawater and shellfish for 3 or 4 days after 33.0 mm and 116.1mm rainfall events to determine how rainfall events increase the adverse impact of inland pollution sources on shellfish growing area . In the discharges from WWTPs, the range of coliform group and fecal coliform was 13-17,000 and 11-1,300 MPN/100 mL after 33.0 mm rainfall and was 490-35,000 and 330-13,000 MPN/100 mL after 116.1 mm rainfall events. Also, the range of fecal coliform and the radius of calculated impacted area of 5 major inland pollution sources contaminants was from 7.8 to 130,000 MPN/100 mL and from 4 to 960 m after 33.0mm rainfall and was from 79 to 540,000 MPN/100 mL and from 10 to 1,100 m after 116.1 mm rainfall events. The fecal coliform of seawaters from 16 stations in the designated area and 15 stations in the adjacent area ranged from < 1.8 to 17 and from < 1.8 to 14 MPN/100 mL, respectively. The *E. coli* level of shellfish at 4 stations in the designated area ranged from < 18 to 230 MPN/100 g.

Keywords: *E. coli*, Fecal coliforms, Narodo Area, Rainfall, Shellfish

서 론

나로도 해역은 우리나라 고흥반도 남단에 위치하고 있는 해역으로 도화면, 포두면, 동래면 및 동일면에 접하고 있고, 평

균 수심은 7 m 정도의 얇은 해역으로 두개의 협수로와 남쪽으로는 하나의 개방역을 통하여 해수가 흐르고 하고있다 (Lee M.O, 1994; Park *et al.*, 2012; Choi *et al.*, 2021). 나로도 해역에서 주로 생산되는 패류는 굴, 바지락 등이 있으며 바지락 생산해역 중 일부는 해양수산부의 고시에 따라 수출용 패류생산해역으로 지정되어 있다 (MOF, 2024; MOF 2023; US FDA,2023).

굴, 바지락 같은 이매패류는 이동성이 거의 없고 여과섭이 (Filter feeding) 를 통한 먹이활동을 하는 특성을 가지고 있어 해수에 부유하는 세균, 바이러스 등의 미생물학적 위해요소를 축적하게 된다. 또한 육지와 인접한 연안 또는 갯벌 등에서 양식 및 채취되어 주변 육상으로부터 유입되는 오염물질에

Received: September 08, 2025; Revised: September 16, 2025; Accepted: September 25, 2025

Corresponding author: Deok Hoon Kim

Tel: +82 (61) 690-8992, e-mail: break00@korea.kr 1225-3480/24904

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.

의해서 쉽게 오염될 수 있으며 오염된 패류 섭취 시 식중독을 유발할 수 있어 패류의 안전에 문제가 되고 있다 (Feldhusen, 2000; Iwamoto *et al.*, 2010; Lees, 2000; Potasman *et al.*, 2002., Rippey, 1994).

특히 육상에서 발생한 하천, 생활하수, 하수처리장 배출수 및 가축사육수 등의 오염원은 다량의 강우로 인해 보다 많은 유동성을 가지게 되고, 해역으로 유입되는 양이 증가하게 되어 패류의 위생안전성에 직접적인 위협을 초래할 수 있으므로 (Ha *et al.*, 2013; Oh *et al.*, 2012; Saylor *et al.*, 1975) 생산단계에서부터 체계적인 위생관리가 필요하다.

이러한 이유로 인해 미국, EU 등의 선진국 및 우리나라는 패류 위생관리 프로그램을 운영하며 미생물학적 위해요소를 관리하고 있다. 미국은 패류생산해역 해수의 분변계대장균 (fecal coliform) 을 지표로 해역을 평가하고 있으며, EU는 패류에 대한 *Escherichia coli* (*E. coli*) 를 지표로 해역을 등급화하고 이에 따라 생산되는 패류를 즉시 출하 또는 정화하거나 가열조리 조치하는 등의 관리가 이루어지고 있다 (MOF 2024, MOF 2023, European Commission, 2019; US FDA, 2023). 우리나라는 해양수산부의 한국패류위생계획 (KSSP, Korean Shellfish Sanitation Program) 에 근거하여 해수 및 패류에 대하여 위생관리를 하고 있다.

미국의 패류위생관리 프로그램 (NSSP, National Shellfish Sanitation Program) 에 따르면 오염원이 강우 등의 기상 상황에 따라 유입량이 증가하여 해역 영향을 미칠 수 있는 것으로 보고하고있다 (US FDA, 2023). 이에 우리나라는 강우 발생에 따라 조건부 관리 계획이 수립되어있다. 나로도 해역의 경우 강우량이 15-22 mm일 경우 2일 (48시간), 22 mm를 초과하는 경우 7일 (168시간) 동안 패류 채취 금지를 하고 있다. 현행 채취금지 기준은 십여 년 전 조사된 결과를 근거로 설정 되어있으므로 최근 동 해역의 오염원 변화에 따른 영향이 반영되어 있지 않다. 특히, 나로도 해역은 해안가 주변으로 캠핑시설, 펜션 및 카페 등이 신축되면서 다양한 육상 오염원이 증가하여 강우 발생 시 해역에 미치는 영향이 증가할 것으로 예상됨에 따라 강우에 대한 나로도 해역의 패류 채취 기준설정이 추가적으로 필요한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 강우 발생 이후에 나로도 해역의 주변 육상오염원이 해역에 미치는 영향을 파악하고 해수 및 패류의 위생상태를 확인하여 동 해역에서 생산되는 패류의 안전을 확보할 수 있는 패류 채취 제한 기준을 재확립하기 위한 기초자료를 확보하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 조사지점 및 시료채취

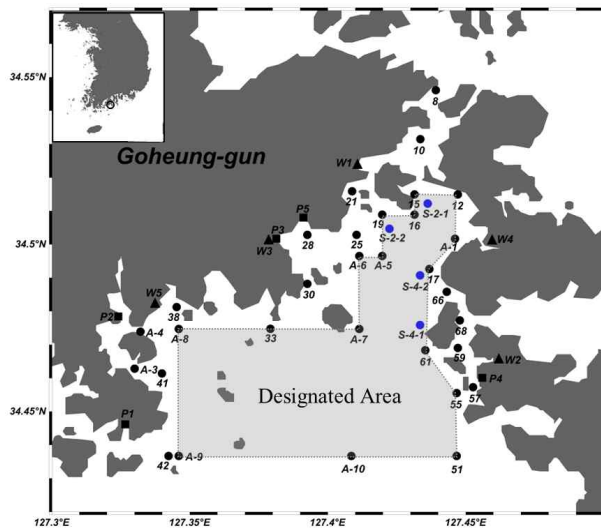


Fig. 1. Sampling stations in the Narodo Area; ●: Sea waters, ●: Short neck clams, ▲:Waste water treatment plants, ■ Major inland pollution sources.

강우에 따른 나로도 해역 해수 및 패류의 위생상태를 평가하기 위하여 해수 31개소, 나로도 해역의 주요 생산품종인 바지락 (*Ruditapes philippinarum*) 4개소, 주요 육상오염원 5개소, 하수처리장 5개소를 선정하였다 (Fig. 1).

해수 및 패류에 대한 조사정점은 해역으로 배출되는 오염원이 밀집된 마을 연안과 지정해역 경계선 및 내부에 선정하였으며, 주요 육상오염원에 대한 조사정점은 2019년에 실시한 나로도 해역 주변 육상오염원의 미생물학적 위해요소 전수조사 결과를 바탕으로 분변오염도가 높거나 오염원의 유량이 많고 인구 밀집도가 높은 마을의 생활하수를 선정하였다.

시료는 33.0 및 116.1 mm 강우가 발생하였던 2022년 3월 20일 및 2022년 7월 19일에 강우 발생 이후 3일간 (24시간, 48시간, 72시간 또는 96시간) 채취하였고, 해수는 멸균된 250 mL 용기를 이용하여 해수면에서 약 10 cm 깊이에서 채수하였으며, 패류는 멸균 처리된 Whirl-Pak (Nasco, Janesville, WI, USA) 에 보관하였다. 주요 육상오염원은 무균 처리된 1L 채수병에 보관하였으며, 방출되는 유량은 유속계 (Hach FH950; Hach, Loveland, Co, USA) 를 사용하여 측정하였다. 모든 시료는 실험실까지 저온상태 (0-10℃) 로 운반하여 채취 후 24시간 내에 분석하였다.

2. 미생물학적 위해요소 분석

채취된 시료의 생균수, 대장균군 (Coliform group) 및 분변계대장균 (Fecal coliform) 분석은 Recommended Procedures for the Examination of Sea water and Shellfish (APHA, 1970) 에 따랐으며, 대장균 (*E. coli*) 은

Table 1. Dilution, medium and culture conditions for microbiological analysis

Items	Procedure	Dilution	Medium and Culture	Reference
Standard plate count	Pour plating	2 plate, 2 dilution	Plate count Agar (Merk, USA) (35 ± 0.5)°C , (48 ± 3) hr	
Coliform Group	Presumptive test	5 tube 3 dilution	Lauryl Tryptose Broth(BD, USA) (35 ± 0.5)°C ,(24 ± 2) hr and (48 ± 3) hr	APHA, 1970
	Confirmed test		Brilliant Green Bile Lactose Broth (Merk, USA) (35 ± 0.5)°C ,(24 ± 2) hr and (48 ± 3) hr	
Fecal Coliform	Presumptive test	5 tube 3 dilution	Lauryl Tryptose Broth(BD, USA) (35 ± 0.5)°C ,(24 ± 2) hr and (48 ± 3) hr	
	Confirmed test		EC broth (BD, USA) (44.5 ± 0.2)°C ,(24 ± 2) hr	
<i>Escherichia coli</i>	Presumptive test	5 tube 3 dilution	Mineral modified glutamate medium (Oxoid, USA) (37 ± 1.0)°C, (24 ± 2) hr	ISO, 16649-3 :2015
	Confirmed test		Tryptone bile glucuronide agar (Oxoid, USA/Medion,Korea) (44 ± 1.0)°C, (22 ± 2) hr	
MSC	-	-	Mixed tryptone agar [tryptone agar with yeast extract(Merk, USA), Glucose(Sigma, USA), Nacl(Merk, USA), CaCl2(Sigma, USA), Agar (BD, USA)] (36.5 ± 2.0)°C, (24 ± 2) hr	APHA, 2015

Table 2. Calculation formulas to determine 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 (m ³ /day)	Determine loading (MPN/day) / [Standard (14 MPN/100mL) × Conversion (Milliliter to m ³ ; 100,000 mL/m ³)]
Area required (m ² /day)	Dilution water required (m ³ /day) / Average depth (m)
Radius of half-circle (m)	Area required (m ² /day) × 2 / 3.14

Most probable number technique using 5-bromo-4-chloro-3-indolyl-β-D-glucuronide (ISO/TS 16649-3:2015) 로 분석을 수행하였으며, 최확수법 (Most Probable Number, MPN) 을 이용하여 결과를 산출하였다.

Male-specific coliphage (MSC) 의 분석은 Standard methods for the examination of water and wastewater (APHA, 2015) 에 따라 Double-agar-layer method로 분석하였으며, MSC의 숙주세포로 *Escherichia coli* HS(pFamp)R (ATCC 700891) 을 사용하였다. 결과는 Plaque Forming Unit (PFU) 으로 나타내었다 (Table 1).

3. 주요 육상오염원이 해역에 미치는 영향평가

나로도 해역에 인접한 해안선에 위치한 주요 육상오염원이 해역에 미치는 영향을 평가하기 위해 미국 Food and Drug Administration (FDA) 에서 제시한 평가방법에 준하여 결과를 산출하였다. 육상오염원 배출수에서 확인된 분변계대장균 농도 및 유량을 통해 나로도 해역으로 유입되는 일일 분변계대장균 수 (Determine loading (MPN/day)) 을 산출하고, 이후 지정해역 수질 기준인 분변계대장균 14 MPN/100 mL 이하로 희석시키는데 필요한 해수의 양 (Dilution water required(m³/day)) 을 계산하였다. 또한, 나로도 해역의 수심

Table 3. Bacteriological water quality of the final discharges from the WWTPs around the Narodo Area by lapse of time after rainfall events

Station	Results					
	Rainfall (mm)	Day after Rainfall	Coliform group (MPN ¹ /100 mL)	Fecal coliform (MPN/100 mL)	<i>E. coli</i> (MPN/100 mL)	MSC (PFU ² /100 mL)
W1	33.0	1 (16 hr)	- ³⁾	-	-	-
		2 (38 hr)	1,300	240	240	< 10
		3 (62 hr)	790	790	790	< 10
		Total	790-1,300	240-790	240-790	< 10-< 10
	116.1	1 (21 hr)	700	460	460	< 10
		2 (45 hr)	22,000	11,000	11,000	< 10
		4 (95 hr)	4,900	3,300	3,300	< 10
		Total	700-22,000	460-11,000	460-11,000	< 10-< 10
W2	33.0	1 (16 hr)	-	-	-	-
		2 (38 hr)	1,300	1,300	1,300	< 10
		3 (62 hr)	17,000	790	790	< 10
		Total	1,300-17,000	790-1,300	790-1,300	< 10-< 10
	116.1	1 (21 hr)	2,400	330	330	< 10
		2 (45 hr)	22,000	13,000	13,000	< 10
		4 (95 hr)	14,000	4,900	4,900	< 10
		Total	2,400-22,000	330-13,000	330-13,000	< 10-< 10
W3	33.0	1 (16 hr)	-	-	-	-
		2 (38 hr)	490	79	49	< 10
		3 (62 hr)	4,900	330	330	< 10
		Total	490-4,900	79-330	49-330	< 10-< 10
	116.1	1 (21 hr)	3,300	1,700	790	< 10
		2 (45 hr)	7,900	7,900	7,900	< 10
		4 (95 hr)	7,900	7,900	7,900	< 10
		Total	3,300-7,900	1,700-7,900	790-7,900	< 10-< 10
W4	33.0	1 (16 hr)	-	-	-	-
		2 (38 hr)	700	330	330	< 10
		3 (62 hr)	4,900	330	330	< 10
		Total	700-4,900	330-330	330-330	< 10-< 10
	116.1	1 (21 hr)	4,900	1,300	1,300	< 10
		2 (45 hr)	35,000	4,900	4,900	< 10
		4 (95 hr)	7,900	3,300	3,300	< 10
		Total	4,900-35,000	1,300-4,900	1,300-4,900	< 10-< 10
W5	33.0	1 (16 hr)	-	-	-	-
		2 (38 hr)	49	11	11	< 10
		3 (62 hr)	13	13	13	< 10
		Total	13-49	11-13	11-13	< 10-< 10
	116.1	1 (21 hr)	790	790	490	< 10
		2 (45 hr)	490	490	490	< 10
		4 (95 hr)	1,300	1,300	790	< 10
		Total	490-1,300	490-1,300	490-790	< 10-< 10

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

을 고려하여 계산된 해수의 양을 포함하는 구역의 면적 (Area required(m²/day)) 및 영향반경 (Radius of half-circle) 을 산출하였으며 최종적으로 오염원이 해역에 미치는 영향을 평가하였다 (Lee *et al.*, 2024) (Table 2).

결과 및 고찰

1. 강우 발생에 따른 주요 육상오염원 영향 평가

강우 시 나로도 해역 인접 주요 육상오염원이 해역에 미치

Table 4. Calculated impacted areas of the final discharges from the WWTPs around the Narodo Area by lapse of the time after rainfall events

Station	Rainfall (mm)	Day after Rainfall	Flow Rate (L/min)	Fecal coliform (MPN ¹ /100 mL)	Determine Loading (MPN/day)	Dilution water Required (m ³)	Area Required (m ²)	Radius of half-circle (m)
W1	33.0	1 (16 hr)	- ²⁾	-	-	-	-	-
		2 (38 hr)	144	240	5.0×10^8	3,555	3,232	50
		3 (62 hr)	144	790	1.6×10^9	11,701	10,637	40
		Total	144-144	240-790	5.0×10^8 - 1.6×10^9	3,555-11,701	3,232-10,637	40-50
	116.1	1 (21 hr)	173	460	1.1×10^9	8,176	81,759	230
		2 (45 hr)	173	11,000	2.7×10^{10}	195,511	488,777	560
		4 (95 hr)	173	3,300	8.2×10^9	58,663	293,266	440
		Total	173-173	460-11,000	1.1×10^9 - 2.7×10^{10}	8,176-195,511	81,759-488,777	230-560
W2	33.0	1 (16 hr)	-	-	-	-	-	-
		2 (38 hr)	359	1,300	6.7×10^9	47,945	26,636	130
		3 (62 hr)	359	790	4.1×10^9	29,136	17,139	110
		Total	359-359	790-1,300	4.1×10^9 - 6.7×10^9	29,136-47,945	17,139-26,636	110-130
	116.1	1 (21 hr)	461	330	2.2×10^9	15,641	17,379	110
		2 (45 hr)	461	13,000	8.6×10^{10}	616,155	684,617	660
		4 (95 hr)	461	4,900	3.3×10^9	232,243	258,048	410
		Total	461-461	330-13,000	2.2×10^9 - 8.6×10^{10}	15,641-616,155	17,379-684,617	110-660
W3	33.0	1 (16 hr)	-	-	-	-	-	-
		2 (38 hr)	48	79	5.4×10^7	386	257	20
		3 (62 hr)	48	330	2.3×10^8	1,613	1,075	30
		Total	48-48	79-330	5.4×10^7 - 2.3×10^8	386-1,613	257-1,075	20-30
	116.1	1 (21 hr)	35	1,700	8.5×10^8	6,043	10,072	80
		2 (45 hr)	35	7,900	3.9×10^9	28,082	46,804	180
		4 (95 hr)	35	7,900	3.9×10^9	28,082	46,804	180
		Total	35-35	1,700-7,900	8.5×10^8 - 3.9×10^9	6,043-28,082	10,072-46,804	80-180
W4	33.0	1 (16 hr)	-	-	-	-	-	-
		2 (38 hr)	131	330	6.2×10^8	4,448	44,479	170
		3 (62 hr)	131	330	6.2×10^8	4,448	44,479	170
		Total	131-131	330-330	6.2×10^8 - 6.2×10^8	4,448-4,448	44,479-44,479	170-170
	116.1	1 (21 hr)	104	1,300	1.9×10^9	8,176	81,759	230
		2 (45 hr)	104	4,900	7.3×10^9	52,255	522,547	580
		4 (95 hr)	104	3,300	4.9×10^9	35,192	35,1920	480
		Total	104-104	1,300-4,900	1.9×10^9 - 7.3×10^9	8,179-52,255	81,759-522,547	230-580
W5	33.0	1 (16 hr)	-	-	-	-	-	-
		2 (38 hr)	143	11	2.3×10^7	161	1,613	40
		3 (62 hr)	143	13	2.7×10^7	191	1,906	40
		Total	143-143	11-13	2.3×10^7 - 2.7×10^7	161-191	1,613-1,906	40-40
	116.1	1 (21 hr)	184	790	2.1×10^9	14,977	18,722	110
		2 (45 hr)	184	490	1.3×10^9	9,290	11,612	90
		4 (95 hr)	184	1,300	3.5×10^9	24,646	30,808	140
		Total	184-184	490-1,300	1.3×10^9 - 3.5×10^9	9,290-24,646	11,612-30,808	90-140

¹MPN, Most probable number, ²⁾-, No sample

는 영향을 평가하기 위하여 33.0 및 116.1 mm의 강우 발생 후 3-4일 간 나로도 해역 배수유역에 위치한 하수처리장, 주요 하천 및 생활하수에 대하여 대장균군, 분변계대장균, *E. coli* 및 MSC 변화를 분석하였다. 나로도 해역에는 하수처리장 5개소가 위치하고 있다. 본 연구에서 33.0 및 116.1 mm의 강우 발생 후 3-4일 간 하수처리장의 배출수에 대해 대장균군을 확인한 결과, 13 - 17,000 및 490 - 35,000 MPN/100 mL로

확인되어 하수도법의 하수처리시설 방류수 수질기준 (대장균군 3,000 CFU/mL) 을 만족하였다 (Table 3). 하지만, 33.0 및 116.1 mm 강우 발생 후 W1, W2 및 W4 하수처리장에서 2일차에 대장균군이 높게 검출되었다가 3일차에 감소하는 경향을 보였고, W3 및 W5 하수처리장은 3, 4일차까지 대장균군 수치가 높게 검출되었다. 또한 분변계대장균의 농도는 33.0 및 116.1 mm 강우 발생 후 시료에서 11-1,300 및

Table 5. Bacteriological water quality of the discharges from major inland pollution sources around the Narodo Area by lapse of time after 33.0 and 116.1 mm rainfall events

Station (Type)	Results					
	Rainfall (mm)	Day after Rainfall	Coliform group (MPN ¹⁾ /100 mL)	Fecal coliform (MPN/100 mL)	<i>E. coli</i> (MPN/100 mL)	MSC (PFU ²⁾ /100 mL)
P1 (DW ⁴⁾)	33.0	1 (16 hr)	24,000	330	330	20
		2 (38 hr)	330,000	130,000	79,000	1,500
		3 (62 hr)	- ³⁾	-	-	-
		Total	24,000-330,000	330-130,000	330-79,000	20-1,500
	116.1	1 (21 hr)	130,000	79,000	79,000	390
		2 (45 hr)	540,000	540,000	350,000	390
		4 (95 hr)	1,600,000	95,000	70,000	6,300
		Total	130,000-1,600,000	79,000-540,000	70,000-350,000	390-6,300
P2 (SW ⁵⁾)	33.0	1 (16 hr)	1,100	230	130	100
		2 (38 hr)	1,300	49	49	< 10
		3 (62 hr)	110	33	33	< 10
		Total	110-1,300	33-230	33-130	< 10-100
	116.1	1 (21 hr)	24,000	3,300	3,300	370
		2 (45 hr)	11,000	13,000	790	70
		4 (95 hr)	4,600	330	330	< 10
		Total	4,600-22,000	330-13,000	330-3,300	< 10-370
P3 (SW)	33.0	1 (16 hr)	790	330	330	< 10
		2 (38 hr)	1,300	49	49	< 10
		3 (62 hr)	1,300	7.8	7.8	< 10
		Total	790-1,300	7.8-330	7.8-330	< 10-< 10
	116.1	1 (21 hr)	9,500	4,900	1,400	< 10
		2 (45 hr)	22,000	1,100	490	20
		4 (95 hr)	7,000	220	220	< 10
		Total	7,000-22,000	220-4,900	220-1,400	< 10-20
P4 (LW ⁶⁾)	33.0	1 (16 hr)	230,000	23,000	23,000	20
		2 (38 hr)	170	79	79	< 10
		3 (62 hr)	170	79	79	< 10
		Total	170-230,000	79-23,000	79-23,000	< 10-20
	116.1	1 (21 hr)	79	79	79	20
		2 (45 hr)	330	240	240	< 10
		4 (95 hr)	14,000	170	68	< 10
		Total	79-14,000	79-240	79-240	< 10-20
P5 (DW)	33.0	1 (16 hr)	-	-	-	-
		2 (38 hr)	-	-	-	-
		3 (62 hr)	-	-	-	-
		Total	-	-	-	-
	116.1	1 (21 hr)	6,400	490	490	10
		2 (45 hr)	33,000	1,300	1,300	< 10
		4 (95 hr)	240,000	1,100	790	< 10
		Total	6,400-240,000	490-1,300	490-1,300	< 10-10

¹⁾MPN, Most probable number, ²⁾PFU, Plaque forming unit, ³⁾-, There was no flow of inland pollution source,

⁴⁾DW, Domestic waste water, ⁵⁾SW, Stream water, ⁶⁾LW, Live fish market water

Table 6. Calculated impacted areas of the discharges from major inland pollution sources around the Narodo Area by lapse of time after 33.0 mm rainfall events

Station (Type)	Day after Rainfall	Flow Rate (L/min)	Fecal coliform (MPN ¹⁾ /100 mL)	Determine Loading (MPN/day)	Dilution water Required (m ³)	Area Required (m ²)	Radius of half-circle (m)
P1 (DW ³⁾)	1 (16 hr)	0.82	330	3.9×10^8	28	28	4
	2 (38 hr)	0.6	130,000	1.1×10^7	8,023	8,023	80
	3 (62 hr)	²⁾ -	-	-	-	-	-
	Total	0.82-0.60	330-130,000	1.1×10^7 - 3.9×10^8	28-8,023	28-8,023	4-80
P2 (SW ⁴⁾)	1 (16 hr)	13,020.0	230	4.3×10^{10}	308,016	616,032	630
	2 (38 hr)	137,760.0	49	9.7×10^{10}	694,310	495,963	570
	3 (62 hr)	107,520.0	33	5.1×10^{10}	364,954	260,681	410
	Total	13,320.0-137,760.0	33-230	4.3×10^{10} - 9.7×10^{10}	308,016-694,310	260,681-616,032	410-630
P3 (SW)	1 (16 hr)	67,200.0	330	3.2×10^{11}	2,280,960	1,425,600	960
	2 (38 hr)	6,000.0	49	4.2×10^9	30,240	30,240	140
	3 (62 hr)	57,600.0	7.8	6.5×10^9	46,212	46,212	180
	Total	6000.0-67,200.0	7.8-330	4.2×10^9 - 3.2×10^{11}	30,240-2,280,960	30,240-1,425,600	140-960
P4 (LW ⁵⁾)	1 (16 hr)	90	23,000	3.5×10^{10}	212,914	212,914	370
	2 (38 hr)	90	79	1.0×10^8	731	731	30
	3 (62 hr)	120	79	1.4×10^8	975	975	60
	Total	90-120	79-23,000	1.0×10^8 - 3.5×10^{10}	731-212,914	731-212,914	30-370
P5 (DW)	1 (16 hr)	-	-	-	-	-	-
	2 (38 hr)	-	-	-	-	-	-
	3 (62 hr)	-	-	-	-	-	-
	Total	-	-	-	-	-	-

¹⁾MPN, Most probable number, ²⁾-, There was no flow of inland pollution source, ³⁾DW, Domestic waste water, ⁴⁾SW, Stream water, ⁵⁾LW, Live fish market water

330–13,000 MPN/100 mL이 검출되었으며, *E. coli*의 농도는 11–1,300 및 330–13,000 MPN/100 mL로 2일차에 높게 검출되었고 이후 점차 감소하는 경향을 보였다 (Table 3). 33.0 mm의 강우보다 116.1 mm 강우시에 하수처리장 배출수의 분변계대장균 및 *E. coli*의 농도가 상대적으로 높게 검출되었으며, 33.0 및 116.1 mm의 강우 발생 후 배수 유역으로부터 계산된 영향 반경 범위는 각각 20–170 m 및 80–660 m로 강우량이 증가할수록 영향범위가 넓어지는 경향을 확인하였다. 이는 다량의 강우 발생시 많은 양의 하수가 하수처리장으로 유입되면서 하수처리시설의 효율이 감소한 것으로 보여지며 (Table 4), 고성만 해역에서도 다량의 강우 (101.5 mm) 발생 시 하수처리시설 효율이 감소하여 강우 3일 후부터 방류수의 수질기준이 양호한 것을 보고한 바가 있다 (Kim *et al.*, 2024). MSC는 장관계바이러스와 크기, 형태 및 환경 중 행동 양상이 유사하고, 패류 중에서도 7일간 생존이 가능

한 것으로 알려져 하수처리장의 효율성 평가를 위한 연구의 지표미생물로 사용되는 것으로 보고되고 있으며 (Burkhardt *et al.*, 1992) 본 연구의 하수처리장 배출수에서는 모두 검출되지 않았다.

33.0 mm 강우 발생 이후, 3일 간 5개의 주요 육상오염원에서 검출된 대장균군, 분변계대장균, *E. coli* 및 MSC의 농도는 110–330,000, 7.8–130,000 및 7.8–79,000 MPN/100 mL, < 10–1,500 PFU/ 100 mL 이었으며, 영향반경은 4–960 m로 확인되었다. 하천수 및 활어판매장 방출수 조사지점인 P2, P3 및 P4 는 강우 발생 1일차에 해역에 미치는 영향이 가장 컸으며, 이후 감소하는 것으로 나타났다 (Table 5, Table 6, Fig 2). 특히, P3 오염원의 영향범위는 140–960 m로 조사 기간 동안 모든 오염원들 중 가장 넓은 범위로 계산되었으나 나로도 해역의 지정해역 경계선 내부까지는 영향을 미치지 않는 것으로 평가되었다.

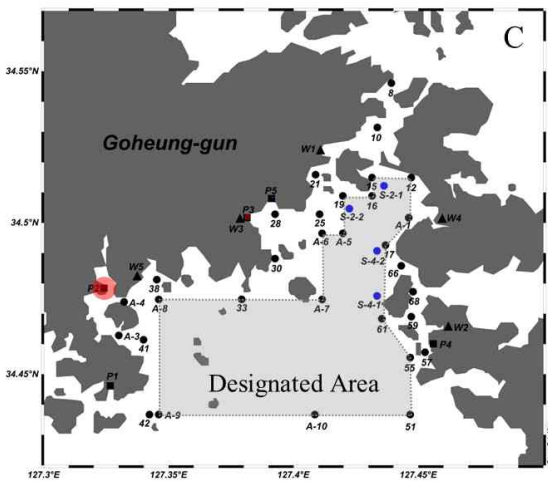
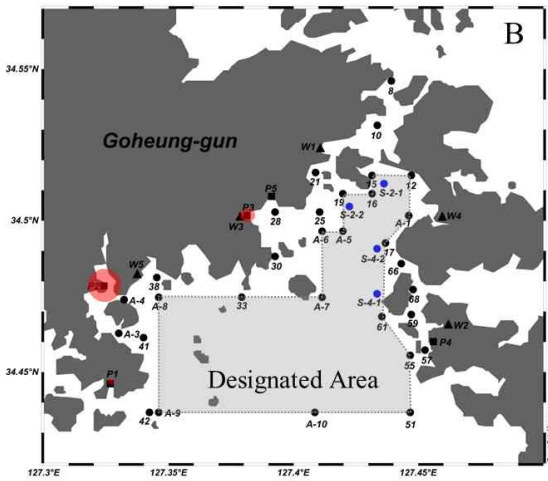
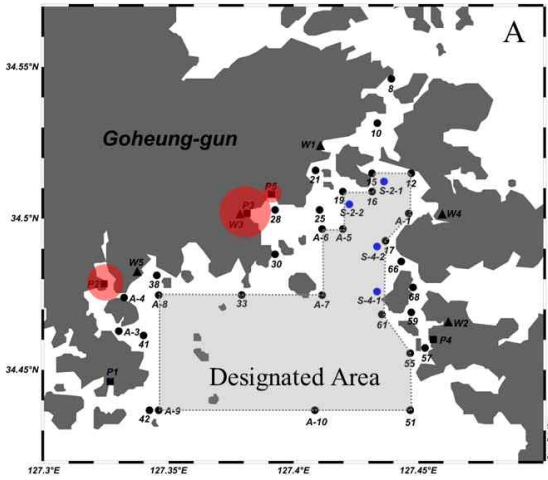


Fig. 2. Estimated diffusion range of the inland pollutants to the coastal area of the Narodo Area after 33.0 mm rainfall event¹⁾; A, after 16 hr; B, after 38 hr; C, after 62 hr. ¹⁾2022.3.20

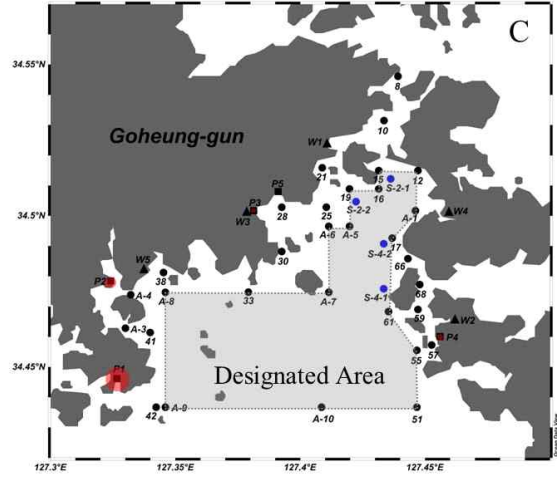
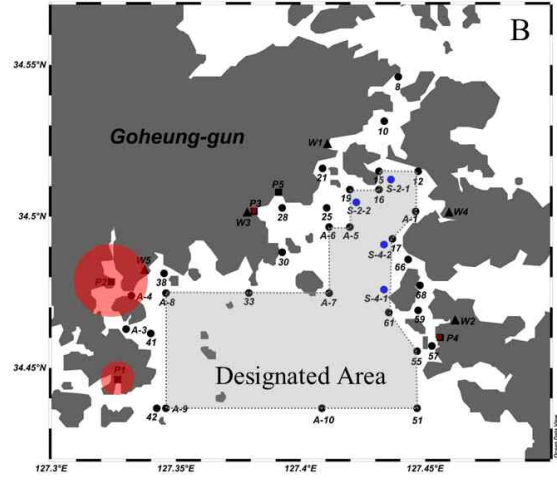
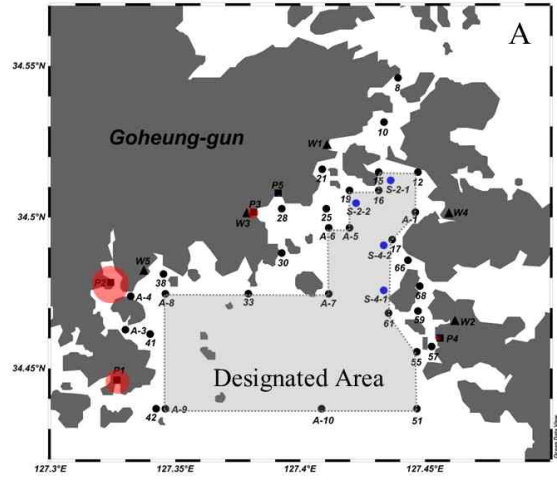


Fig. 3. Estimated diffusion range of inland pollutants to the coastal area of the Narodo Area after 116.1 mm rainfall event¹⁾; A, after 21hr; B, after 45 hr; C, after 95 hr. ¹⁾2022.7.19

Table 7. Calculated impacted areas of the discharges from major inland pollution sources around the Narodo Area by lapse of time after 116.1 mm rainfall events

Station (Type)	Day after Rainfall	Flow Rate (L/min)	Fecal coliform (MPN ¹⁾ /100 mL	Determine Loading (MPN/day)	Dilution water Required (m ³)	Area Required (m ²)	Radius of half-circle (m)
P1 (DW ²⁾)	1 (21 hr)	33.9	79,000	3.9×10^{10}	27,543	275,543	420
	2 (45 hr)	33.9	540,000	2.6×10^{11}	1,883,458	750,382	700
	4 (95 hr)	33.9	95,000	4.6×10^{10}	331,349	331,349	460
	Total	33.9-33.9	79,000-540,000	3.9×10^{10} - 2.6×10^{11}	27,543-1,883,458	27,543-750,382	420-700
P2 (SW ³⁾)	1 (21 hr)	1,200.0	11,000	5.7×10^{10}	407,314	714,586	660
	2 (45 hr)	2,160.0	13,000	4.0×10^{11}	2,888,229	1,964,781	1,100
	4 (95 hr)	1,200.0	330	5.7×10^9	40,731	135,771	300
	Total	1,200.0-2,160.0	330-13,000	5.7×10^9 - 4.0×10^{11}	40,731-2,888,229	135,771-1,964,781	300-1,100
P3 (SW)	1 (21 hr)	144.0	4,900	1.0×10^{10}	72,576	72,576	220
	2 (45 hr)	168.0	1,100	2.7×10^9	19,008	19,008	110
	4 (95 hr)	90.0	220	2.9×10^8	2,037	2,037	40
	Total	90.0-168.0	220-4,900	2.9×10^8 - 1.0×10^{10}	2,037-72,576	2,037-72,576	40-220
P4 (LW ⁴⁾)	1 (21 hr)	36.0	79	4.1×10^7	293	154	10
	2 (45 hr)	27.0	240	9.3×10^7	667	351	20
	4 (95 hr)	18.0	170	4.4×10^7	315	166	10
	Total	18.0-36.0	79-240	4.1×10^7 - 9.3×10^7	293-667	154-351	10-20
P5 (DW)	1 (21 hr)	66.0	490	4.7×10^8	3,326	3,024	50
	2 (45 hr)	66.0	1,300	1.2×10^9	8,825	8,023	70
	4 (95 hr)	42.0	1,100	6.7×10^8	4,752	4,320	60
	Total	42.0-66.0	490-1,300	4.7×10^8 - 1.2×10^9	3,326-8,825	3,024-8,023	50-70

¹⁾MPN, Most probable number, ²⁾DW, Domestic waste water, ³⁾SW, Stream water, ⁴⁾LW, Live fish market water

116.1 mm 강우 발생 이후, 4일간 5개의 주요 육상오염원에서 검출된 대장균군, 분변계대장균, *E. coli* 및 MSC의 농도는 79–1,600,000, 79–540,000 및 79–350,000 MPN/100 mL, < 10–6,300 PFU/ 100 mL 이었으며, 영향반경은 10–1,100 m로 확인되었다. 33.0 mm의 강우 발생 이후 보다 대장균군, 분변계대장균, *E. coli* 및 MSC 의 농도, 배출수의 유량 및 계산된 영향반경 모두 더 높은 것으로 확인되었다 (Table 5, Table 7, Fig. 3). 모든 육상오염원 조사지점의 경우, 강우 발생 2일차까지 해역에 미칠 수 있는 영향반경이 증가하였다가 4일차에는 감소하는 경향을 보였으며 지정 해역의 경계선 내부까지 영향을 미치지 않는 것으로 평가되었다. 하지만, 강우량이 증가할수록 육상오염원의 영향 범위도 증가함으로 하수처리장 차집관로 확대, 가정집정화조 수거 등 관리가 필요할 것으로 판단된다. 여자만 해역에서도 강우 발생 시 오염원에 상당한 영향을 받는 것으로 보고하였으며 (Lee *et al.*, 2024) 진동만 해역에서도 강우 발생 시 오염원의 방출 유

량 및 농도가 증가하여 해역 경계선 내부까지 영향을 미치는 것으로 보고한 바 있다 (Lee *et al.*, 2023). 이와 같이, 강우 발생으로 인하여 오염원의 오염 부하량이 일시적으로 증하여 영향범위가 패류생산해역에 영향을 미칠 수 있으므로 하수처리장 신설이나 기존 하수처리장의 차집율을 개선하는 등의 대책이 요구된다.

2. 강우 발생에 따른 나로도 해역의 해수에 대한 영향

33.0 및 116.1 mm 강우 발생 후 3–4일간 나로도 해역 내에 위치한 31개소 조사정점에서 검출된 분변계대장균 농도를 Table 8에 나타내었다. 먼저 33.0 mm의 강우 발생 이후, 3일 동안 나로도 해역의 지정해역 경계선 내부에 위치한 해수의 분변계대장균 농도의 범위는 < 1.8–4.5 MPN/100 mL 이었으며, 지정해역 주변에 위치한 해수의 범위는 < 1.8–11.0 MPN/100 mL로 검출되었다. 강우 발생 3일차 나로도 해역 남동쪽에 위치한 해수 조사 정점 57 조사지점 에서 11.0

Table 8. Levels of fecal coliform in seawaters collected in the Narodo Area after rainfall events

Station		Fecal coliform (MPN/100 mL)					
		Day after 33.0 mm rainfall event			Day after 116.1 mm rainfall event		
		1 (16 hr)	2 (38 hr)	3 (62 hr)	1 (21 hr)	2 (45 hr)	4 (95 hr)
Designated area	12	< 1.8	< 1.8	2.0	2.0	< 1.8	< 1.8
	15	< 1.8	< 1.8	2.0	< 1.8	< 1.8	< 1.8
	16	< 1.8	2.0	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8
	17	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8
	19	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8
	33	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8
	51	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8
	55	< 1.8	4.5	< 1.8	4.5	< 1.8	< 1.8
	61	< 1.8	< 1.8	< 1.8	4.5	< 1.8	< 1.8
	A-1	< 1.8	< 1.8	< 1.8	2.0	< 1.8	< 1.8
	A-5	< 1.8	< 1.8	< 1.8	2.0	< 1.8	< 1.8
	A-6	2.0	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8
	A-7	< 1.8	< 1.8	2.0	4.0	< 1.8	< 1.8
	A-8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	2.0	< 1.8	< 1.8
	A-9	2.0	< 1.8	< 1.8	17.0	< 1.8	< 1.8
A-10	< 1.8	< 1.8	< 1.8	2.0	< 1.8	< 1.8	
Total		< 1.8-2.0	< 1.8-4.5	< 1.8-2.0	< 1.8-17.0	< 1.8-< 1.8	< 1.8-< 1.8
Adjacent area	8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	2.0	< 1.8	< 1.8
	10	2.0	< 1.8	< 1.8	4.0	< 1.8	< 1.8
	21	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8
	25	< 1.8	< 1.8	< 1.8	4.0	< 1.8	< 1.8
	28	< 1.8	< 1.8	2.0	2.0	< 1.8	< 1.8
	30	< 1.8	2.0	< 1.8	1.8	< 1.8	< 1.8
	38	< 1.8	< 1.8	< 1.8	11.0	< 1.8	< 1.8
	41	< 1.8	< 1.8	2.0	< 1.8	< 1.8	< 1.8
	42	< 1.8	< 1.8	< 1.8	14.0	< 1.8	< 1.8
	57	2.0	< 1.8	11.0	< 1.8	4.5	< 1.8
	59	< 1.8	< 1.8	< 1.8	2.0	3.7	< 1.8
	66	< 1.8	4.5	2.0	< 1.8	< 1.8	< 1.8
	68	< 1.8	< 1.8	2.0	< 1.8	< 1.8	< 1.8
	A-3	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8
	A-4	2.0	2.0	< 1.8	7.8	< 1.8	< 1.8
Total		< 1.8-2.0	< 1.8-4.5	<1.8-11.0	<1.8-14.0	< 1.8-4.5	< 1.8-< 1.8

MPN/100 mL 검출되어 나로도 활어판매장에서 방출되는 생활하수에 의해 간헐적으로 영향을 받는 것으로 판단된다. 미국의 패류 위생관리 프로그램의 경우 (NSSP, National Shellfish Sanitation Program), 해역에 대해 30회 이상의 위생조사를 수행하여, 조사정점에서 검출된 분변계대장균의 기하학적 평균치가 14 MPN/100 mL 미만이고 90% percentile 값이 43 MPN/100 mL 미만일 경우, 허가해역으로 분류가 되며 (U.S. FDA, 2023). 우리나라는 KSSP (Korean Shellfish Sanitation Program) 에 의해 기하학적 평균이 14 MPN/100 mL 미만일 경우, 지정해역으로 평가한

다 (MOF, 2024). 따라서 33.0 mm 강우 발생 후 3일 동안 나로도 해역의 해수 조차지점은 미국기준으로 허가해역 수준, 국내기준은 지정해역 수준으로 양호한 위생상태를 나타내었다.

116.1 mm의 강우 발생 21시간 이후, 지정해역 경계선 내부에 위치한 해수의 분변계대장균 농도의 범위는 < 1.8-17.0 MPN/100 mL 이었으며, 지정해역 주변에 위치한 해수에서 < 1.8-14.0 MPN/100 mL로 검출되었다. 45시간부터 95시간 동안에는 지정해역 내에 위치한 해수에서 < 1.8-< 1.8 MPN/100 mL이었으며, 지정해역 경계선 주변에 위치한 해수에서 < 1.8-4.5 MPN/100 mL으로 확인되었다. 강우 발생 1

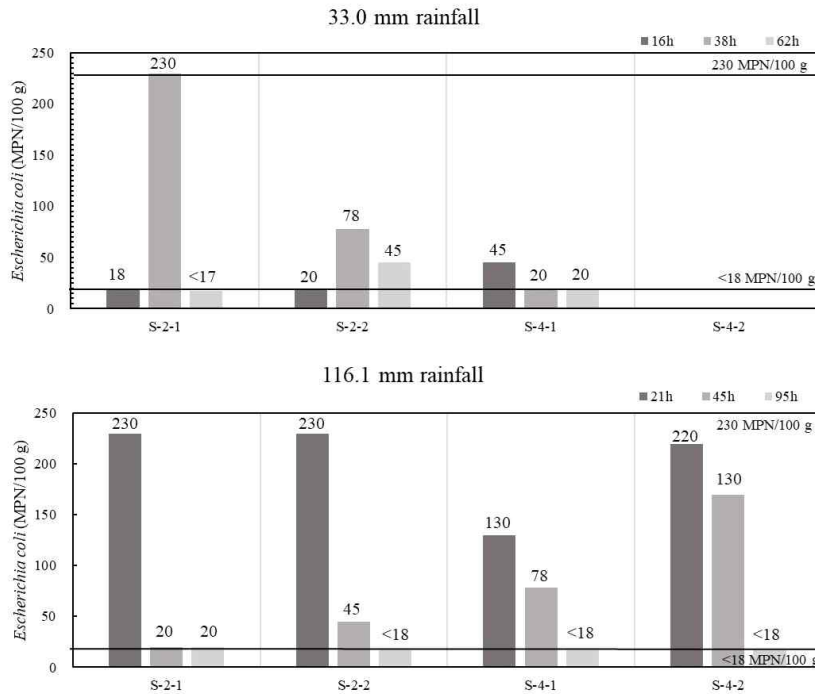


Fig. 4. Change of *E. coli* levels in shellfish samples in the Narodo Area by lapse of time after rainfall events (< 18 MPN/100 g, Detection limit; 230 MPN/100 g, EU regulation class A). ^{1)*}: No sample.

일차 나로도 해역 남서쪽에 위치한 해수 조사정점 42 및 A-9 조사지점에서 14 MPN/100 mL 이상의 수치가 검출되어 나로도 해역 남서측의 도화면 단장마을에서 방출되는 미처리된 생활하수의 영향을 받는 것으로 판단된다 (Table. 8). 또한, 강우 발생 2 및 3일 후에는 분변계대장균이 검출되지 않아 오염도가 감소하는 경향을 나타내었다. 116.1 mm 강우 발생 시에는 2일차부터 지정해역 및 허가해역 수준으로 회복되는 것으로 나타났다.

본 연구의 주요 육상오염원 영향평가에 따르면, 116.1 mm 강우 발생 24시간 이후 도화면에 위치한 P1은 A-9 해수 조사정점까지 영향을 없는 것으로 계산되었으나 해당 조사정점은 육상오염원의 영향을 받는 것으로 나타났다. 이는, 동 해역의 이전 연구에 따르면 강우 종료 직후, 마을과 인접한 연안에 머물던 분변오염물질이 조류 및 조석에 의해 해역에 확산되는 과정으로 해수에 영향을 미치는 것으로 보고하였으며 (Park *et al.*, 2012), 본 연구결과에서도 이러한 영향으로 인해 해당 조사정점에서 분변계대장균이 높게 검출된 것으로 판단된다.

3. 강우 발생에 따른 나로도 해역의 패류에 대한 영향

강우 발생에 따른 육상오염원의 해역 유입으로 인해 오염도가 증가된 해수가 나로도 해역의 패류에 미치는 영향을 확인하기 위해 육상과 인접한 4개의 패류 조사정점을 선정하여 조

사를 수행하였다. 33.0 및 116.1 mm의 강우발생 후 3-4일 동안 패류 조사정점에서 검출된 *E. coli*의 농도는 각각 < 18-230 MPN/100 g 및 < 18-230 MPN/100 g의 범위로 검출되었다 (Fig. 4). EU의 규정에 따르면, 해역에서 수확한 패류에 대해 30회 이상의 조사결과에서 *E. coli* 농도가 모든 시료에서 700 MPN/100 g 이하이고, 시료수의 80%가 230 MPN/100 g 이하를 충족할 경우, 해역을 A등급으로 분류하고 있다 (EU Commission, 2019).

33.0 mm 강우 후, 나로도 해역에서 채취한 패류의 *E. coli* 농도는 1, 2 및 3일 후 각각 18-45, 20-230 및 < 18-45 MPN/100 g으로 검출되어 EU A 등급 기준을 모두 만족하였으나, 육상오염원과 인접해 있는 S-2-1 조사지점에서 강우 발생 2일 후 *E. coli* 농도가 230 MPN/100 g으로 검출되어 상대적으로 높은 오염도를 보여주었으며 강우 발생 3일 후 오염도가 감소하여 < 18 MPN/100 g으로 회복되는 것을 확인하였다. 강우 2일차에 높은 오염도를 나타내었는데, 이는 패류는 시간경과에 따라 해수에 포함된 세균을 축적하였기 때문이라 사료된다 (Ha *et al.*, 2013).

116.1 mm 강우 후, 나로도 해역에서 채취한 패류의 *E. coli* 농도는 1, 2 및 4 일 후 각각 130-230, 20-170 및 < 18-20 MPN/100 g 으로 검출되었으며, 육상오염원과 인접해 있는 S-2-1 및 S-2-2는 *E. coli* 농도가 모두 230 MPN/100 g

이며, 하수처리장과 인접해 있는 S-4-1 및 S-4-2는 130 및 220 MPN/100 g으로 상대적으로 높게 검출이 되었으나, 강우 발생 2일 후부터 오염도가 감소하여 4일 후에는 20 MPN/100 g 이하로 해역의 위생상태가 회복되는 것을 확인하였다. 이와 같은 결과는 강우 발생후 1일차에 33.0 mm 강우 발생보다 패류의 *E. coli* 농도가 높게 검출되었으며, 이는 다량의 강우로 인해 조사기간동안 주요육상오염원 및 하수처리장 방출수의 분변오염도가 증가하고, 유량이 많아져 해역의 패류에 미치는 영향이 더 큰 것으로 확인되었다.

33.0 와 116.1 mm의 강우 발생 이후 본 연구의 패류 조사 정점으로부터 검출된 *E. coli*의 농도는 230 MPN/100 g을 초과하지 않아 해당 EU 기준을 충족하는 것으로 평가되었다. 또한 우리나라 식품위생법의 식품의 기준 및 규격에 의하면 식품으로서 소비되는 생식용 생굴의 *E. coli* 기준은 230 MPN/100 g 이하로, 본 연구의 패류 조사정점에 대해 해당 기준을 만족하는 것으로 확인되었다.

이상의 연구결과에 따르면, 나로도 해역에서 강우량이 증가함에 따라 해수의 분변계대장균 및 패류의 *E. coli*의 오염정도가 높아지는 경향을 보여주었다. 따라서 나로도 해역에서 생산되는 패류의 안전성 확보를 위해서는 육상오염원 조사, 하수처리장의 확충 및 가정집 정화조 수거 및 관리를 통해 해역에 영향을 미칠 수 있는 오염원 관리 및 모니터링과 지속적인 위생조사가 필요할 것으로 판단된다.

요 약

본 연구에서는 수출용 패류생산 지정해역인 나로도 해역에 강우가 발생 시 오염원이 지정해역 해수 및 패류의 미생물학적 위생 안전성에 미치는 영향을 평가하여 나로도 해역에서 생산되는 패류의 채취제한기준설정을 위한 기초자료를 확보하고자 하였다.

나로도 해역 인근에 위치한 주요육상오염원은 5개소로 33.0 및 116.1 mm 강우 후, 3-4일간 오염원 방출수에서 검출된 분변계대장균의 수치는 7.8-130,000 및 79-540,000 MPN/100 mL이며, 영향반경은 4-960 및 10-1,100 m로 확인되었으며 인근 하수처리장 5개소에 대한 방류수의 분변계대장균의 농도는 11-1,300 및 330-13,000 MPN/100 mL이며, 영향반경은 20-170 및 80-660 m로 확인되었다. 전체적으로 강우량이 증가할수록 방출되는 오염원의 오염량이 증가하였으며 영향반경 또한 넓게 계산되었다. 나로도 해역 인근 육상오염원의 오염도 및 영향반경은 강우 발생 후 시간이 경과할수록 점차 감소하는 경향을 보였으며 지정해역 경계선 내부까지 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다.

나로도 해역 31개 해수 조사정점에서 검출된 분변계대장균

의 농도는 강우량에 따라 < 1.8-4.5 및 < 1.8-17.0 MPN/100 mL로 나타났다. 특히 지정해역내에 위치한 조사정점 16개 중 1개에서 116.1 mm 강우 발생시 나로도해역 남서쪽에 위치한 오염원들에 의해 오염원의 부하량이 증가하면서 1일차에 17.0 MPN/100 mL로 14 MPN/100 mL를 초과하여 검출되었으나, 점차 감소하여 4일차에는 < 1.8 MPN/100 mL로 확인되었다.

나로도 해역의 지정해역내에 설정된 4개 조사지점에 대한 마지막의 위생상태를 확인한 결과, 33.0 및 116.1 mm 강우 후 검출된 *E. coli*의 농도는 각각 < 18-230 MPN/100 g 으로 확인되었으며 33.0 및 116.1 mm 강우 발생 후 모든 지점에서 국내 및 국외 기준을 초과하지 않았으나, 전체적으로 강우량이 높을수록 *E. coli* 농도가 높게 나타났으며, 점차 감소하는 경향을 보였다. 나로도 해역은 강우 발생 시 해역 부근의 오염원 부하량 증가로 인해 패류에 영향을 미치는 것으로 확인 되었다.

이상의 결과, 33.0 mm 강우발생시, 강우 발생 2일 후까지 영향을 미치고 3일차에 분변오염도가 감소하였으나 116.1 mm 강우후에는 강우발생 2일 후까지 영향을 미치고 4일차에 패류의 위생 안전성이 회복되는 것으로 확인되었다.

현재 한국패류위생계획 (MOF, 2024) 에서 나로도 해역의 강우 발생에 따라 패류 채취제한 기준은 22 mm 초과시 7일 (168시간) 그 이하는 2일 (48시간) 으로 설정되어 있다. 그러나 본 연구결과 33.0 mm 강우 발생 시 패류의 안전성 회복에 최소 3일 (72시간) 이 소요되며, 116.1 mm 강우 발생 시에도 최소 4일 (96시간) 이 필요한 것으로 나타나 보다 세분화된 관리 기준의 수립 필요한 것으로 보인다. 지속적인 해역 모니터링과 강우 발생과 회복 소요기간을 연구를 세분화하여 추진할 필요가 있으며, 배수구역의 변화를 반영한 주기적 채취제한 기준을 개정을 통해 패류의 안전성을 확보와 어업인 생산활동의 불편을 최소화 해야 할 것으로 사료된다.

사 사

이 논문은 2025년도 국립수산물과학원 수산시험연구사업 (R2025055) 의 지원으로 수행된 연구입니다.

REFERENCES

APHA (American Public Health Association). (1970) Recommended procedures for the examination of seawater and shellfish. 4th Ed. Washington D.C., U.S.A., 1-47.

APHA (American Public Health Association). (2015) Standard methods for the examination of water and wastewater. 23rd Ed. Washington D.C., U.S.A.

- Burkhardt, W. 3rd., Watkins, W.D. and Rippey, S.R. (1992) Survival and replication of male-specific bacteriophages in molluscan shellfish. *Applied and Environmental Microbiology*, **58**: 1371-1373. <https://doi.org/10.1128/aem.58.4.1371-1373.1992>.
- Choi, W.S., Shin, S.B., Yoon, M.C., Lee, J.H., Kim, K.Y. and Lim, C.W. (2021) The effect of Major Inland Pollution Sources on Sea and Shellfish in Narodo Area, Korea. *Korean Journal of Malacology*, **37**(4): 155-163. <https://doi.org/10.9710/kjm.2021.37.4.155>
- European Commission. (2019) Commission 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 and amending Commission Regulation (EC) No 2074/2005 as regards official controls. Official Journal of the European Union.
- Feldhusen, F. (2000) The role of seafood in bacterial foodborne disease. *Microbes Infect*, **2**: 1651-1660. [https://doi.org/10.1016/s1286-4579\(00\)01321-6](https://doi.org/10.1016/s1286-4579(00)01321-6).
- Ha, K.S., Yoo, H.D., Shim, K.B., Kim, J.H., Lee, T.S., Kim, P.H., Lee, H.J. and Yu, H.S. (2013) The effects of inland pollution sources around the port of Jeokyang and Jangpo after rainfall events on bacteriological water quality in the Changseon area, Korea. *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **46**(2): 160-167. Retrieved from <https://doi.org/10.5657/KFAS.2013.0160>.
- 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-indoly- β -D-glucuronide. 16649-3.
- Iwamoto, M., Ayers, T., Mabon, B.E. And Swerdlow, D.L. (2010) Epidemiology 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>
- Kim, J.H., Yoon, M.C., Jo, 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. Retrieved from <https://doi.org/10.9710/kjm.2023.39.3.89>
- Lee, M.O. (1994) Numerical model experiments on the tidal current variations due to the bridge piers construction near the straits of Narodo islands. *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **27**: 47-58.
- 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. *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **56**(6): 788-809
- Lee, J.H., Kim, D.H., Hong, Y.W., Kim, P.H., Yu, H.S. and Choi, W.S. (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 Yeojabay, Korea. *Korean Journal of Malacology*, **40**(4): 221-231. <https://doi.org/10.9710/kjm.024.40.4.221>
- MOF. (2024). Korean Shellfish Sanitation Program. Retrieved from <http://www.mof.go.kr> on August 4.
- MOF. (2023). Sanitary standard of water quality in Shellfish growing area. Retrieved from <http://www.law.go.kr> on August 4.
- Oh, E.G., Yoo H.D., Yoo H.S., Ha K.S., Shin S.B., Lee T.S., Kim J.H. and Son K.T. (2012) Removal of Fecal indicator Bacteria from Bivalves under Natural and Electrolyzed Water. *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **45**: 11-16. Retrieved from <https://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2012.0011>.
- 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. *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **45**(5): 414-422. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2012.0414>.
- Potasman, I., Paz, A. and Odeh, M. (2002) Infectious outbreaks associated with bivalve shellfish consumption: A worldwide perspective. *Clinical Infectious Diseases*, **35**: 921-928. <https://doi.org/10.1086/342330>.
- Rippey, S.R. (1994) Infectious diseases associated with molluscan shellfish consumption. *Clinical Microbiology Reviews*, **7**: 419-425.
- Sayler, G.S., Nelson, J.D. Jr., Justice, A. and Colwell, R.R. (1975) Distribution and significance of fecal indicator organisms in the upper Chesapeake Bay. *Applied Microbiology*, **30**: 625-638. <https://doi.org/10.1128/am.30.4.625-638.1975>.
- US FDA (U.S. Food and Drug Administration) (2023) National Shellfish Sanitation Program, guide for the control of molluscan shellfish., silver Spring. Retrieved from <https://www.fda.gov/Food/federal-state-local-tribal-and-territorial-cooperative-human-food-programs/national-shellfish-sanitation-program-nssp.htm> on August 4.

