강우 발생에 따른 육상오염원이 나로도 해역의 세균학적 수질에 미치는 영향 평가

박큰바위 · 조미라¹ · 김연계 · 이희정¹ · 권지영¹ · 손광태¹ · 이태식*

국립수산물과학원 남해수산연구소, ¹국립수산물과학원 식품안전과

Evaluation of the Effects of the Inland Pollution Sources after Rainfall Events on the Bacteriological Water Quality in Narodo Area, Korea

Kunbawui Park, Mi Ra Jo¹, Yeon Kye Kim, Hee Jung Lee¹, Ji Young Kwon¹, Kwang Tae Son¹ and
Tae Seek Lee*

Southwest Sea Fisheries Research Institute, National Fisheries Research and Development Institute, Yeosu 556-823, Korea

¹Food Safety Research Division, National Fisheries Research and Development Institute, Busan 619-705, Korea

This study evaluated the effect of the inland pollution sources on the bacteriological water quality in Narodo area after rainfall events. Following 16 mm of rainfall, the water discharged from Dohwa Stream and contaminants from Balpo village had a very limited effect on bacteriological water quality in adjacent area and the affected area did not extend to the designated area. In comparison, after 33 mm of rainfall, the density of fecal coliforms at stations located in the mouth of Dohwa stream and the discharg point of contamination sources located in Balpo village were lower than after 16 mm of rainfall. These results were obtained during an extreme high tide near the coast the contaminants discharged from Dohwa stream and Balpo village. Therefore, it is necessary to conduct a detailed survey to examine the effects of tides on the diffusion characteristics of the contaminants discharged from Dohwa stream and Balpo village in order to manage of Narodo area efficiently.

Key words: Fecal coliform, Narodo, Rainfall, Tides

서 론

나로도 해역은 고흥반도 남단에 위치하고 있는 해역으로 동쪽으로는 고흥군 동일면과 봉래면, 서쪽으로는 고흥군 도화면, 북쪽으로는 고흥군 포두면에 접하여 있고, 평균수심은 7 m 정도의 얇은 해역으로 두개의 협수로와 남쪽으로 외해와 마주하는 하나의 개방역을 통하여 해수가 유·출입하고 있으며(Lee, 1994), 주로 생산되는 패류는 굴, 바지락 등이다.

패류는 연안해역에 주로 서식하며 육상과 인접해 있어 배수 유역에서 유입되는 오염물질의 영향을 쉽게 받을 수 있으며, 또한 이동성이 거의 없고, 여과섭이 활동을 통하여 먹이를 섭취하는 패류는 해수 중에 부유하는 병원성세균 및 바이러스 등과 같은 위해물질들이 체내에 쉽게 축적이 이루어짐으로 오염된 패류의 섭취로 인한 식중독 사고 사례는 오래전부터 많이 보고가 되어 있다(Grimes, 1991; Cliver, 1997; Feldhusen,

2000; Potasman et al., 2002).

이러한 패류의 위생안전성 확보를 위하여 생산해역에 대한 위생관리는 매우 중요하며, 미국, 유럽연합 등 선진국에서는 패류생산해역의 위생 상태에 따라 등급을 부여하여 관리하고 있다(European Commission, 2004; US FDA, 2009).

우리나라의 경우 수산물품질관리법에 규정된 위생기준에 부합하는 해역을 수출용패류생산지정해역(이하 지정해역)으로 설정하여 관리하고 있으며 고흥군 나로도 해역은 1996년부터 1998년까지 실시한 위생조사 결과를 바탕으로 1999년 3월에 4,398 ha에 대하여 수출용패류생산지정해역으로 설정하였다.

한편, 연안해역의 세균학적 수질에 영향을 미치는 주요 분변 오염원은 주거지, 농경지, 가축 사육지 등 여러 요인에 의해 발생할 수 있는데, 이러한 지역에서 발생한 분변오염원은 하천 및 하수구 등을 통하여 해역으로 유입된다(Chigbu et al., 2005; Hunter et al., 1999). 특히 강우는 해역의 세균학적 수

Article history;

Received 18 July 2012; Revised 23 September 2012; Accepted 9 October 2012

*Corresponding author: Tel: +82. 61. 690. 8993 Fax: +82. 61. 685. 9073

E-mail address: tslee@nfrdi.go.kr

Kor J Fish Aquat Sci 45(5) 414-422, October 2012

http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2012.0414

pISSN:0374-8111

© The Korean Society of Fisheries and Aquatic Science. All rights reserved

질에 가장 큰 영향을 미치는 요인인자이며 강우로 인해 발생하는 부유성 현탁물질은 육상으로부터 기인된 분변계대장균을 해역으로 운반하는 중요한 매개체로 알려져 있다(Sayler et al., 1975). 자연하천은 하천 주변 유역에 산재되어 있는 각종 오염 물질을 모아서 해역으로 방출하는 역할을 하기 때문에 강우 발생시 많은 오염물질이 일시에 해역으로 유입되어 분변계대장균의 오염정도가 증가하였다고 보고하였다(Hill et al., 2006; Lee et al., 2010).

최근 지구 온난화와 같은 기상 이변의 영향으로 인하여 최근 10년간(2001-2010년)의 연 강우량이 1,411.9 mm로 과거 평년에 대비하면 97.4 mm가 증가하였다고 하며(Lee et al., 2011), 또한 최근 20년간 강우량은 7% 증가한 반면 강우일수는 오히려 14% 감소한 것으로 보고하였다(KMA, 2009). 이는 강우 시 집중강우를 동반한다는 의미로, 집중강우 발생에 따른 많은 육상오염원일 일시에 해역으로 유입되어 연안 해역에서 식하는 패류에 악영향을 미칠 수 있다.

또한, 최근에는 패류 수확기인 10월에서 익년 5월 사이에 집중강우가 발생하는 빈도가 증가하고 있으나, 강우 시에 발생하는 오염원의 유입에 따른 해수 및 패류에 미치는 위생학적 영향 평가에 대한 연구가 부족한 실정이다.

한편, 전남 고흥군 도화면에 위치한 도화천은 하천유역 주변으로 인구가 밀집된 거주지역과 상업지역이 발달되어 있으며 하천의 길이가 6.26 km이고, 하천유역의 면적이 18.2 km²로서 나로도 해역의 배수유역에 위치한 자연하천 중 가장 규모 큰 하천이며, 또한 고흥군 도화면에 위치한 발포마을은 나로도 해역에 위치한 해안가 마을 중 가장 발달되어 있는 마을이며 발포 마을에는 발포천이 흐른다.

강우시 도화천과 발포마을 유역에서 유입되는 오염물질의 영향으로 인하여 해역의 세균학적 수질은 영향을 받을 수가 있다. 그러므로 나로도 해역에서 생산되는 패류의 위생안전성을 보장하기 위해서는 강우 계급별에 따라 발생하는 오염물질들이 해역에 미치는 영향과 시간경과에 따른 위생학적 변화를 파악할 필요성이 있다.

따라서 본 연구에서는 건기 및 강우 발생 계급에 따른 도화천 및 발포마을 유역에서 발생하는 오염물질이 나로도 패류생산 해역에 미치는 영향을 평가하였으며 또한 강우 발생 시간경과에 따른 해수 및 굴에서의 위생학적 변화를 비교하여 해역의 위생학적 안전성을 평가하였다.

재료 및 방법

조사지점의 선정

전라남도 고흥군 도화면 발포마을 소재 오염원(No. 100, 104 및 107)과 지방하천인 도화천(No. 108) 방출수가 건기 및 강우 발생 계급에 따른 나로도 해역의 세균학적 수질에 미치는 영향 범위를 파악하기 위하여 나로도 해역의 조류 특성과 조석 등을

고려하여 육상오염원의 최종방출지점으로부터 약 0.1-0.7 km의 간격으로 총 10개소(N-1-N-10)의 해수 조사지점을 선정하였으며 굴(*Crassostrea gigas*)은 발포마을 지선으로부터 1.28 km 떨어진 곳에 1개소(N-6)를 선정하였다(Fig. 1).

Fig. 1. Sampling stations in the Narodo area.

■, Contamination sources; ●, Seawater; ○, Seawater and oyster.

조사시기의 선정 및 시료채취

건기조사는 오염원의 배출수량과 오염도를 최소화하고, 해역에 미치는 영향이 거의 없는 시기를 고려하여 나로도 해역에 조사전 일주일전부터 강우가 발생하지 않은 시기로 2009년 6월 8일에 실시하였다.

우기조사는 나로도 해역의 세균학적 수질에 영향을 미칠 수 있다고 판단되는 최소 강우량을 고려하여 1일 강우량이 33.0 mm인 2010년 3월 16일과 16.0 mm인 2010년 10월 24일을 각각 조사일로 선정하였으며, 16.0 mm 및 33.0 mm 우기조사 시료는 강우 발생 시간경과에 따른 나로도 패류생산해역의 위생학적 안전성을 평가하기 위하여 16.0 mm 및 33.0 mm 강우 종료 직후 즉시 그리고 강우 종료 시점으로부터 24시간 경과 후에 각각 시료를 채취하여 조사를 실시하였다(Table 1).

해수 및 하천수의 시료채취는 각 조사지점에서 표층용 채수기를 이용하여 멸균된 250 mL 시료병에 채취하였으며, 굴은 수하연의 상층, 중층, 하층의 각 1개 부착기를 채취하여 멸균된 황동술로 부착물 등을 제거한 후 물기를 제거하고 멸균된 스텐레스 스틸 용기에 담았다. 채취한 모든 시료는 10℃ 이하로 유지하여 실험실로 운반하고 미생물시험을 실시하였다.

하천수 및 해수 중의 염분은 수질분석기(YSI 556 multiprobe system; Yellow Springs, YSI Life Science, OH, USA)를 사용하여 현장에서 측정하였으며 그리고 본 조사에 사용된 1일

Table 1. The general state of sanitary survey after rainfall events

Rainfall (mm)	Time (h)	Sampling date	Sampling time	High Tide (hour : min, mm)	Low tide (hour : min, mm)
16	0	2010. 10. 24.	15:03-16:16	10:00, 352 21:57, 303	03:39, 36 16:14, 79
	24	2010. 10. 25.	15:39-17:09	10:35, 353 22:27, 294	04:09, 36 16:49, 88
33	0	2010. 3. 16.	10:08-11:15	10:01, 322 22:11, 325	03:54, 29 16:10, 26
	24	2010. 3. 17.	10:10-11:05	10:24, 319 22:42, 331	04:22, 30 16:35, 21

강우량 및 조석은 기상청 고홍관측소 및 국립해양조사원의 자료를 근거로 사용하였다.

미생물 시험

분변계대장균 시험은 Recommended Procedures for the Sea Water and Shellfish (APHA, 1970)에 준하여 최확수(MPN, most probable number)법으로 실시하였으며, 각 희석 단계별로 5개 시험관을 사용하고 그 결과는 100 mL 또는 100 g 당 MPN으로 나타내었다. 분변계대장균 추정시험 배지로는 Lauryl Tryptose Broth (Difco, USA)를, 확정시험 배지로는 EC Medium (Merck, Germany)를 사용하였다.

Male-specific bacteriophage 검출시험

하천수 및 해수 중에 함유되어 있는 Male-specific bacteriophage (MSB) 검출시험은 DeBartolomeis 와 Cabelli (1991) 법 그리고 굴 중에 함유되어 있는 MSB는 Burkhardt W 3rd et al. (1992)의 한천 중첩법(agar overlay method)을 사용하였다. 실험에 사용한 MSB 숙주세포로는 *Escherichia coli* HS (pFamp)R (ATCC 700891)을 사용하였으며 멸균한 2.5 mL soft agar에 *E. coli* HS (pFamp)R 배양액을 0.2 mL 접종하고, 2.5 mL 시료를 첨가한 후 bottom agar에 중첩시키고, 35℃에서 24 시간 배양 후 형성된 plaque 수를 측정하고, MSB에 대한 결과 표기는 100 mL 또는 100 g 당 PFU (plaque-forming unit)으로 나타내었다.

발포마을 소재 오염원 및 도화천 방출수의 유량 측정 및 영향범위 평가

발포마을 소재 오염원 및 도화천 방출수의 유량 측정은 유속계(Marsh-McBirney portable flowmeter, Flo-Mate Model 2000, Maryland, USA)을 이용하여 유속을 측정한 후 유속-면적법(Velocity-Area Method)을 이용하여 유량을 산출하였다.

발포마을 소재 오염원 및 도화천 방출수가 나로도 해역에 미치는 영향범위는 미국 Food and Drug Administration (FDA)에서 제시하고 있는 “Evaluation of pollution source

(Advanced Growing Area Training-evaluation of pollution sources, 2006)”에 준하여 다음과 같은 식을 사용하여 계산하였다. 즉 각각의 오염원 방출수에 함유되어 있는 분변계대장균 수(Concentration of fecal coliform)에 유량(Flow)을 곱하여 나로도 해역으로 유입되는 1일 부하 분변계대장균 수(Determine loading)를 계산하였다.

○ 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 m³; 100,000 mL/m³)]

○ Area required (m²/day)=Dilution water required (m³/day) / Average depth (m)

1일 부하 분변계대장균 수를 지정해역의 세균학적 수질기준인 14 MPN/100 mL 이하로 희석시킬 수 있는 해수의 양(Dilution water required)을 산출하였다. 그리고 지정해역의 세균학적 수질기준인 14 MPN/100 mL 이하로 희석시킬 수 있는 해수의 양을 조사해역의 평균수심(Average depth)으로 나누어 주어 오염원 방출수에 영향을 받을 것으로 추정되는 폐쇄해역(Area required) 범위를 구하였다. 그리고 본 조사에 사용된 평균수심은 국립해양조사원의 자료를 근거로 오염원 최종방출 지점로부터 나로도 지정해역 경계선까지의 수심을 합산한 후 평균내어 산출하였다.

결과 및 고찰

해수의 일반적 성상

강우 발생 후 나로도 해역으로 유입되는 육상오염원 방출수(No. 100, 104, 107 및 108)가 해수 중의 염분 변화에 미치는 영향을 알아본 결과, 건기조사시 10개 조사지점(N-1-N-10)에서의 염분의 범위는 32.83-33.25 psu, 16 mm 강우 종료 직후와 강우가 종료된 시점으로부터 24시간 경과 후의 염분의 범위는 각각 28.46-31.83 및 31.59-31.77 psu이었으며, 33 mm 강

우 종료 직후와 강우가 종료된 시점으로부터 24시간 경과 후의 염분의 범위는 각각 32.41-33.12 및 29.21-33.19 psu으로 확인되었다.

33 mm 강우 발생으로 인하여 육상오염원의 방출수량이 16 mm 강우 발생때보다 크게 증가하였음에도 불구하고, 33 mm 강우 종료 직후의 염분 농도가 16 mm 강우 종료 직후의 염분의 농도보다 높은 이유는 16 mm 강우 종료 직후 시료 채취시 조석은 최저조이였으나 33 mm 강우 종료 직후 시료 채취시 조석은 최고조로 33 mm 강우 종료 직후 해수의 양이 16 mm 강우 종료 직후보다 크게 증가하였기 때문에 16 mm 강우 종료 직후의 염분의 농도보다 높게 나타난 것으로 추정되었다.

한편, 나로도 해역에 대한 건기조사 및 우기조사시 확인된 염분의 결과는 Kim et al. (2003)이 나로도 해역의 표층수의 염분의 범위가 30.7-33.6 psu 이었다고 보고한 결과와 뚜렷한 차이는 없는 것으로 확인되었다.

건기시 해수 중의 위생학적 성상 변화

강우 발생 정도에 따라 발포마을 소재 오염원 및 도화천 방출수가 나로도 해역의 위생학적 성상 변화에 미치는 영향을 알아보기 전에 건기시 이들 오염원에서 방출되는 오염물질이 나로도 해역의 수질에 미치는 영향을 조사하였으며 그 결과를 Table 2에 나타내었다.

건기조사시 발포마을 소재 오염원 및 도화천 방출수 중의 분변계대장균 수의 범위는 33-3,300 MPN/100 mL이었으며, 이들 오염원에서 배출되는 방출수가 해역의 세균학적 수질에 미치는 영향을 알아보기 위하여 설정한 해수지점에서의 분변계대장균 수의 범위는 <1.8-2.0 MPN/100 mL로 나타나 강우가

발생하지 않는 건기시에는 발포마을 소재 오염원 및 도화천 방출수가 나로도 해역의 세균학적 수질에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 확인되었다.

강우 발생 후 해수 중의 위생학적 성상 변화

강우 발생 정도에 따라 발포마을 소재 오염원 및 도화천 방출수에 함유되어 있는 오염물질이 나로도 해역에 미치는 영향범위와 강우 발생 시간경과에 따른 나로도 해역의 해수 중의 위생학적 성상 변화를 조사하였으며 그 결과를 Table 3에 나타내었다.

16 mm 강우 종료 직후 발포마을 소재 오염원 및 도화천 방출수 중의 분변계대장균 수와 MSB의 범위는 각각 110-70,000 MPN/100 mL 및 <10-9,130 PFU/100 mL이었으며, 이들 오염원과 인접한 주변해역(Adjacent area)에 위치한 해수 조사 지점 (N-1-N-5 및 N-8)에서의 분변계대장균 수와 MSB의 범위는 각각 <1.8-330 MPN/100 mL 및 <10-10 PFU/100 mL으로 발포마을 지선으로부터 0.1 km 떨어진 곳에 위치한 N-1 지점에서 분변계대장균 수가 330 MPN/100 mL으로 미국의 패류생산허가해역 기준의 한 조건으로 사용되는 분변계대장균 기하평균 14 MPN/100 mL을 초과하였으며, MSB도 N-1 지점에서만 10 PFU/100 mL으로 검출되었으나, 나로도 지정해역(Designated area) 경계선 및 내부에 위치한 해수 조사지점 (N-6, N-7, N-9 및 N-10)에서의 분변계대장균 수의 범위는 <1.8-2.0 MPN/100 mL으로 양호한 수질상태를 나타내고 있었으며 MSB도 검출되지 않았다.

한편, 16 mm 강우가 종료된 시점으로부터 24시간 경과 후 발포마을 소재 오염원 및 도화천 방출수 중의 분변계대장균 수

Table 2. Results of the fecal coliform and MSB in the discharged water from contamination sources and seawater under dry-weather condition

Area	Sample	Station	Fecal coliform (MPN/100 mL)	MSB (PFU/100 mL)
Drainage area	Discharged water (Stream, sewer)	100	33	1,200
		104	3,300	<10
		107	140	<10
		108	49	<10
Adjacent area	Seawater	N-1	2.0	<10
		N-2	<1.8	<10
		N-3	<1.8	<10
		N-4	<1.8	<10
		N-5	<1.8	<10
		N-8	<1.8	<10
Designated area	Seawater	N-6	<1.8	<10
		N-7	<1.8	<10
		N-9	<1.8	<10
		N-10	<1.8	<10

Table 3. Results of the fecal coliform and MSB in the discharged water from contamination sources and seawater after rainfall events

Area	Sample	Station	16.0 mm rainfall				33.0 mm rainfall			
			0 h		24 h		0 h		24 h	
			Fecal coliform (MPN/100 mL)	MSB (PFU/100 mL)	Fecal coliform (MPN/100 mL)	MSB (PFU/100 mL)	Fecal coliform (MPN/100 mL)	MSB (PFU/100 mL)	Fecal coliform (MPN/100 mL)	MSB (PFU/100 mL)
Drainage area	Dis-charged water (Stream, sewer)	100	23,000	140	7,900	<10	4,900	290	130	<10
		104	70,000	9,130	11,000	3,900	4,900	<10	160,000	10
		107	230	<10	2,300	<10	1,700	<10	7,900	<10
		108	110	<10	110	<10	7,900	80	790	20
Adjacent area	Seawater	N-1	330	10	49	<10	11	40	<1.8	30
		N-2	2.0	<10	22	<10	6.8	60	11	<10
		N-3	7.8	<10	<1.8	<10	2.0	<10	<1.8	<10
		N-4	<1.8	<10	<1.8	<10	17	<10	6.8	<10
		N-5	<1.8	<10	<1.8	<10	6.8	<10	<1.8	<10
		N-8	<1.8	<10	<1.8	<10	2.0	<10	<1.8	<10
Designated area	Seawater	N-6	<1.8	<10	2.0	<10	1.8	<10	<1.8	<10
		N-7	<1.8	<10	<1.8	<10	<1.8	<10	<1.8	<10
		N-9	<1.8	<10	<1.8	<10	2.0	<10	<1.8	<10
		N-10	2.0	<10	<1.8	<10	2.0	<10	<1.8	<10

의 범위는 110-11,000 MPN/100 mL으로 발포마을 지선에서 각각 0.1 및 0.62 km 떨어진 곳에 위치한 N-1 및 N-2 지점에서 분변계대장균수가 각각 49 및 22 MPN/100 mL으로 기준치를 초과하여 검출되었으나 나로도 지정해역 경계선 및 내부에 위치한 해수 조사지점에서의 분변계대장균 수의 범위는 <1.8-2.0 MPN/100 mL으로 미국의 패류생산허가해역 기준에 부합하는 것으로 나타내었다.

이상의 결과, 16 mm 강우 발생에 따른 발포마을 소재 오염원 및 도화천 방출수는 오염원과 인접한 연안 해역에만 부분적으로 영향을 미치고, 나로도 지정해역까지는 오염물질이 도달하지 못하는 것으로 확인되었다.

한편, 16 mm 강우가 종료된 시점으로부터 24시간 경과 후 발포마을 소재 오염원의 방출수에 대한 분변계대장균의 오염정도가 16 mm 강우 종료 직후 보다 감소하였음에도 불구하고 발포마을 지선에서 0.62 km 떨어진 곳에 위치한 N-2 지점에서의 확인된 분변계대장균의 오염정도 보다 증가한 것으로 나타났다.

이러한 결과는 16 mm 강우 종료 직후에는 발포마을 지선과 인접한 연안해역에 머물러 있었던 오염물질이 조류와 조석의 영향으로 인하여 해역 내부로 확산되면서 N-2 지점에서 분변계대장균의 오염정도가 증가한 것으로 추정되었다.

한편, 조류의 흐름이 빠르고, 외해와 연결되어 있어 나로도 해역과 비슷한 특징을 가지고 있는 고성군 자란만의 경우, 33.5 mm 강우 종료 6시간 후(최고조) 삼봉천 하구에서 0.7 km 떨어진 지점에서의 분변계대장균 수는 <1.8 MPN/100 mL이었

으나 24시간 후(최저조)에는 9.3 MPN/100 mL으로 나타내어 조석을 영향을 일부 확인할 수 있었다고 보고하였다(Lee et al., 2010).

또한, 나로도 해역처럼 외해와 연결되어 있지는 않지만, 조류의 소통이 원활한 해역으로 알려져 있는 남해군 강진만의 경우, 33 mm 강우 종료 직후 봉천 최종방출지점에 인접한 조사 지점에서보다는 강진만 지정해역 내에 위치한 조사지점에서 분변계대장균의 오염정도가 높게 나타났으며 조사 전날에 해역 내부에 확산되어 있던 봉천 방출수의 오염물질의 영향 때문이라고 보고하고 있어 본 연구결과와 유사한 결과를 나타내었다(Park et al., 2011).

33 mm 강우 종료 직후 발포마을 소재 오염원(No. 104 및 107) 방출수 중의 분변계대장균 수의 범위는 1,700-4,900 MPN/100 mL이었으나 발포마을 지선으로부터 0.1 km 떨어진 곳에 위치한 N-1 지점에서의 분변계대장균 수는 11 MPN/100 mL으로 33 mm 강우 종료 직후 이들 오염원으로부터 나로도 해역으로 유입되는 1일 부하 분변계대장균 수가 16 mm 강우 종료 직후보다 증가하였음에도 불구하고, 16 mm 강우 종료 직후 N-1 지점에서 확인된 330 MPN/100 mL 보다 오히려 낮게 나타났다.

한편, 연안해역에서 분변계대장균의 분포는 육상에서 유입되는 오염원의 유량, 오염도, 해역의 크기, 조석 등 여러 요인에 의해 영향을 받으며, 또한 각 해역의 특성에 따라 달라지며, 특히 조석의 변화는 연안해역에 대한 위생지표세균의 분포에 영향을 미치는 중요한 인자이며, 창조시에는 육상에서 해역으로

유입되는 하천수를 연안으로 밀어내어 해역 내의 확산을 저해하지만 낙조시에는 하천수를 만 내부로 확산시키는 역할을 한다고 알려져 있다(Mallin et al., 1999; Lee et al., 2010).

상기의 내용을 종합해보면, 33 mm 강우 종료 직후 시료 채취가 최고조시로 발포마을 소재 오염원에서 방출되는 오염물질은 해역 내부로 확산되지 못하고, 발포마을 지선과 인접한 연안해역에서 머물러 있었기 때문에 16 mm 강우 종료 직후보다 해수지점에서의 분변계대장균의 오염정도가 낮게 나타난 것으로 추정되었다.

한편, 33 mm 강우 종료 직후 도화천 방출수 중의 분변계대장균 수는 7,900 MPN/100 mL이었으며, 도화천 최종방출구로부터 0.35 km 떨어진 곳에 위치한 N-4 지점에서의 분변계대장균 수가 17 MPN/100 mL으로 미국의 패류생산허가해역 기준을 초과하여 검출되었으며, 33 mm 강우 종료 직후 시료 채취가 최고조시에 이루어졌음에도 이러한 결과가 나타난 이유는 시료 채취전날에 도화천에서 해역 내부로 확산되어 있던 오염물질을 영향인 것으로 추정되었다.

33 mm 강우가 종료된 시점으로부터 24시간 경과 후에는 N-4 지점에서의 분변계대장균 수가 6.8 MPN/100 mL으로 미국의 패류생산허가해역 기준에 부합하는 것으로 확인되었다.

한편, 33 mm 강우 종료 직후 발포마을 소재 오염원 방출수 중의 MSB의 범위는 <10-290 PFU/100 mL으로 발포마을 지선에서 각각 0.1 및 0.62 km 떨어진 곳에 위치한 N-1 및 N-2 지점에서 MSB가 각각 40 및 60 PFU/100 mL으로 검출되었으나 지정해역 경계선 및 내부에 위치한 해수 조사지점에서는 MSB가 검출되지 않았다.

Ha et al. (2011)도 강우 발생에 따른 간덕천 방출수가 거제만 해역에 미치는 영향평가 연구에서도 15 mm 강우 발생시 간덕천 최종방출구와 인접한 연안해역에 위치한 해수지점(S-1-S-3)에서만 MSB가 10-40 PFU/100 mL으로 검출되었다고 보고하였다.

지금까지의 연구결과를 요약해보면, 33 mm 강우 발생으로 인하여 발포마을 소재 오염원 및 도화천에서 해역으로 유입되는 오염물질은 오염원과 인접한 연안해역에만 부분적으로 영향을 미치고, 나로도 지정해역까지는 도달하지 못하는 것으로 확인되었으며, 또한 33 mm 강우가 종료된 시점으로부터 24시간 경과 후에는 지정해역뿐만 아니라 오염원과 인접한 연안해역에 위치한 해수지점에서도 미국의 패류생산허가해역 기준에 부합하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 외해와 연결되어 있는 나로도 해역의 특성 때문에 조류의 소동이 원활하여 해역으로 유입된 분변성 오염물질이 빠르게 희석되었기 때문인 것으로 사료된다.

한편, 우리나라는 생산패류의 위생학적 안전성 확보를 위하여 채취 전 1일 강우량이 15-22 mm 범위 일때에는 2일 동안, 22 mm를 초과한 경우에는 7일 동안 패류 채취를 금지하고 있다(MIFFAFF, 2012).

또한, 지구 온난화와 같은 기상 이변의 영향으로 패류 수확기

인 10월에서 익년 5월 사이에 강우가 발생하는 빈도가 증가하고 있으며, 강우량도 함께 증가하고 있기 때문에 생산패류의 위생학적 안전성 확보와 함께 더불어 어업인의 소득보장을 위한 패류채취 금지기간의 완화가 필요하다.

따라서 효율적인 나로도 패류생산해역의 관리방안을 마련하기 위해서는 좀더 다양한 강우 발생 계급별과 함께 조석 변화에 따른 육상오염원이 해역에 미치는 영향에 대한 체계적인 연구가 필요 할 것으로 판단되며, 본 연구결과가 효율적인 나로도 패류생산해역의 관리방안 마련에 필요한 기초자료로써 활용이 될 것으로 사료된다.

육상오염원 방출수의 계산된 영향범위와 해수 중의 분변계대장균 함량 비교

16 mm 및 33 mm의 강우 발생에 따른 발포마을 소재 오염원 및 도화천 방출수가 나로도 해역에 미치는 영향범위를 미국 FDA에서 제시하고 있는 “Evaluation of pollution source (Advanced Growing Area Training - evaluation of pollution sources, 2006)”의 지침에 준하여 산출하였으며 그 결과를 Fig. 2 및 Table 4에 나타내었다.

16 mm 강우 종료 직후, 발포마을 소재 오염원 방출수가 해역으로 유입되는 일일 부하 분변계대장균 수의 범위는 2.3×10^8 - 8.8×10^{10} MPN/day으로 해수 중의 분변계대장균 수를 14 MPN/100 mL 이하로 희석시킬 수 있는 물의 양으로 산출하여 나로도 해역에 미치는 영향범위를 계산해 볼 때 20-386 m까지 영향을 미치는 것으로 계산되었다.

이러한 결과는 16 mm 강우 종료 직후, 발포마을 지선으로부

Fig. 2. The estimated diffusion range of the discharged water from contamination sources after rainfall events. (A), just after 16 mm rainfall; (B), after 24 hours from 16 mm rainfall ended; (C), just after 33 mm rainfall; (D), after 24 hours from 33 mm rainfall ended.

Table 4. The estimated diffusion range of the discharged water from contamination sources after rainfall events

Rainfall (mm)	Station	Time (h)	Discharge volume (L/min)	Fecal coliform (MPN/100 mL)	Lowest depth (m)	Determine loading (MPN/day)	Dilution water required (m ³)	Area required (m ²)	Radius of half-circle (m)
16	100	0	260	23,000	2.7	8.8×10^{10}	6.3×10^5	2.3×10^5	386
		24	77	7,900	2.7	8.7×10^8	6.2×10^4	2.3×10^4	121
	104	0	5	70,000	2.7	5.0×10^9	3.6×10^4	1.3×10^4	92
		24	3	11,000	2.7	4.7×10^8	3.3×10^3	1.2×10^3	28
	107	0	70	230	2.7	2.3×10^8	1.6×10^3	6.1×10^2	20
		24	70	2,300	2.7	2.3×10^9	1.6×10^4	6.1×10^3	63
	108	0	9,700	110	2.0	1.5×10^{10}	1.0×10^5	5.4×10^4	187
		24	6,600	110	2.0	1.0×10^{10}	7.4×10^4	3.7×10^4	154
33	100	0	7,900	4,900	2.7	5.5×10^{11}	3.9×10^6	1.4×10^6	971
		24	2,400	130	2.7	4.5×10^9	3.2×10^4	1.1×10^4	87
	104	0	5.8	4,900	2.7	4.0×10^8	2.9×10^3	1.0×10^3	26
		24	10	160,000	2.7	2.3×10^{10}	1.6×10^5	6.0×10^4	197
	107	0	300	1,700	2.7	7.5×10^9	5.3×10^4	1.9×10^4	113
		24	270	7,900	2.7	3.1×10^{10}	2.2×10^5	8.3×10^4	231
	108	0	83,000	7,900	2.0	9.5×10^{12}	6.7×10^7	3.3×10^7	4,644
		24	30,307	790	2.0	3.4×10^{11}	2.4×10^6	1.2×10^6	886

터 각각 0.1 및 0.62 km 떨어진 곳에 위치한 N-1 및 N-2 지점에서 해수 중의 분변계대장균 수가 각각 330 및 2.0 MPN/100 mL로 확인되어 16 mm 강우 발생에 따른 발포마을 소재 오염원 방출수가 해역에 영향을 미치는 계산된 영향범위와 실제 해수 중에서의 확인된 분변계대장균 수와 거의 일치하는 것으로 확인되었다.

또한, 16 mm 강우 종료 직후 도화천 방출수가 해역에 미치는 영향평가에서도 도화천 방출수가 해역에 미치는 영향범위가 187 m로 계산되었는데 이는 도화천 최종방출구로부터 0.35 km 떨어진 곳에 위치한 N-4 지점에서의 분변계대장균 수가 <1.8 MPN/100 mL로 확인되어 해역에 미치는 계산된 영향범위와 일치하는 것으로 나타났다.

한편 33 mm 강우 종료 직후 도화천 및 발포마을 소재 오염원 중 발포천(No. 100) 방출수가 나로도 해역에 미치는 영향범위가 각각 4,644 및 971 m로 계산되었으나 실제 도화천 최종방출구로부터 0.98 km 떨어진 곳에 위치한 N-5 지점과 발포마을 지선으로부터 0.62 km 떨어진 곳에 위치한 N-2 지점에서의 분변계대장균수가 공히 6.8 MPN/100 mL로 계산된 영향범위와 큰 차이를 나타내었다.

이러한 결과 차이는 미국 FDA에서 제시하고 있는 지침에 적용하는 평균수심은 최저조시 평균수심으로 33 mm 강우 종료 직후 나로도 해역의 조석은 최고조시로 1일 부하 분변계대장균수를 지정해역의 세균학적 수질기준인 14 MPN/100 mL 이하로 희석시킬 수 있는 해수의 양에서 차이가 있었다.

또한 연안해역에서 분변계대장균의 밀도는 환경에 따라 달라

지는데 강 하구와 같은 좁은 영역에서는 고조부근에서는 확산 범위가 좁고, 평균수면에서 저조에 이르는 동안 멀리까지 확산이 이루어진다고 알려져 있다(Mallin et al., 1999).

따라서 최고조의 영향으로 발포마을 소재 오염원 및 도화천 방출수에 함유되어 있는 오염물질이 해역 내부로 확산되지 못했기 때문에 육상오염원이 해역에 미치는 계산된 영향범위와 실제 해수 중의 분변계대장균 수가 다르게 나타난 것으로 추정되었다.

Park et al. (2011)도 최고조가 되기 약 1시간 전에 조사가 이루어졌던 23 mm 강우 종료 직후 봉천 방출수가 강진만 해역에 미치는 영향범위는 6,233 m로 계산되었으나 실제 봉천 최종방출지점과 인접한 조사지점들에서의 해수 중의 분변계대장균 수의 범위가 <1.8-7.8 MPN/100 mL로 나타나 계산된 영향범위와 큰 차이가 있었다고 보고하고 있어 본 연구결과와 유사한 결과를 나타내었다.

강우 발생에 따른 패류 중의 위생학적 성상 변화

강우 발생 후 나로도 해역으로 유입되는 발포마을 소재 오염원 및 도화천 방출수가 패류 중의 위생학적 성상 변화에 미치는 영향을 Table 5에 나타내었다. 16 및 33 mm 강우 종료 직후 N-6 지점에서 채취한 굴에서의 분변계대장균 수가 각각 78 및 110 MPN/100 g으로 나타났으나, 강우가 종료된 시점으로부터 24시간 경과 후 채취한 굴에서의 분변계대장균수가 각각 <18 및 20 MPN/100 g으로 오염정도가 크게 감소하였으며 MSB도 검출되지 않았다.

Table 5. Concentration of sanitary indicator bacteria in oyster *Crassostrea commercialis*

Area	Station	Dry-weather		16.0 mm rainfall				33.0 mm rainfall			
				0 h		24 h		0 h		24 h	
		Fecal coliform (MPN/100 g)	MSB (PFU/100 g)	Fecal coliform (MPN/100 g)	MSB (PFU/100 g)	Fecal coliform (MPN/100 g)	MSB (PFU/100 g)	Fecal coliform (MPN/100 g)	MSB (PFU/100 g)	Fecal coliform (MPN/100 g)	MSB (PFU/100 g)
Narodo area	N-6	<18	<10	78	<10	<18	<10	110	<10	20	<10

이러한 결과는 나로도 해역이 외해랑 연결되어 있어 조류의 소통이 빠르고, 원활하게 이루어지기 때문에 자연정화(Relaying)에 의해 굴 중에 축적되어 있던 분변계대장균수의 농도가 감소한 것으로 추정되었다.

Son and Fleet (1980)도 굴(*Crassostrea commercialis*)에 대장균을 590-600 CFU/100 g으로 인위적으로 오염시킨 후 오염물질이 없는 물에 정화하여 2일 후에는 8-18 CFU/100 g으로, Oh et al. (2012)도 분변계대장균에 오염된 굴을 자연정화시켰을 때 초기 분변계대장균 수가 1,700 MPN/100 g이었으나 정화 1일 후에는 110 MPN/100 g으로 감소하였다고 보고하고 있어 본 연구결과와 유사한 결과를 나타내었다.

지금까지의 연구결과를 종합해보면, 건기시 발포마을 소재 오염원 및 도화천 방출수가 나로도 해역에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 확인이 되었으나, 강우 발생시 이들 오염원에서 방출되는 오염물질들은 나로도 지정해역까지는 영향을 미치지 않는 못하였지만, 오염원과 인접한 연안해역에는 부분적으로 영향을 미치고 있는 것을 확인되었다.

한편, 연안해역의 세균학적 수질은 해역으로 유입되는 오염원의 유량, 오염도, 해역의 크기, 조석 등 여러 요인들에 의해 영향을 받으며, 강우량과 조석에 따라 오염원이 해역에 미치는 영향범위가 크게 달라지는 것으로 나타났다. 그러나 강우량과 조석의 조건을 동시에 맞추어 오염원이 해역에 미치는 영향범위 평가 연구를 실시하기에는 어려움이 있다.

따라서 강우량과 조석 변화에 따른 발포마을 소재 오염원 및 도화천 방출수가 나로도 해역에 미치는 영향범위에 대해서는 로다민(Rhodamine)과 같은 색소를 이용한 수리학적 조사(Hydrographic Dye study)가 추가적으로 이루어져야 할 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 국립수산물품질관리원(수출패류 생산해역 및 수산물 위생조사, RP-2012-FS-010)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

A.P.H.A. 1970. Recommended procedures for the examination of seawater and shellfish. 4th Ed. American Public Health Association, Washington DC, USA, 1-47.

Burkhardt W 3rd, Watkins WD and Rippey SR. 1992. Survival and replication of male-specific bacteriophages in molluscan shellfish. Appl Environ Microbiol 58, 1371-1373.

Chigbu P, Gordon S and Tchounwou PB. 2005. The seasonality of fecal coliform bacteria pollution and its influence on closures of shellfish harvesting areas in Mississippi Sound. Int J Environ Public Health 2, 362-373.

Cliver DO. 1997. Virus transmission via foods. Food Technol 51, 71-78.

DeBartolomeis J and Cabelli VJ. 1991. Evaluation of an Escherichia coli of F male-specific bacteriophages. Appl Environ Microbiol 57, 1301-1305.

European Commission. 2004. Regulation (EC) No 854/2004 of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 laying down specific rules for the organization of official control on products of animal origin intended for human consumption. Off J Eur Communities L155, 206-321.

Feldhusen F. 2000. The role of seafood in bacterial foodborne disease. Microbes Infect 2, 1651-1660.

Grimes DJ. 1991. Ecology of estuarine bacteria capable of causing human disease: A review. Estuaries 14, 345-360.

Ha KS, Yoo HD, Shim KB, Kim JH, Lee TS, Kim PH, Ju JY and Lee HJ. 2011. Evaluation of the influence of inland pollution sources on shellfish growing areas after rainfall events in Geoje bay, Korea. Kor J Fish Aquat Sci 44, 612-621.

Hill DD, Owens WE and Tchounwou PB. 2006. The impact of rainfall on fecal coliform bacteria in Bayou Dorcheat (North Louisiana). Int J Environ Public Health 3, 114-117.

Hunter C, perkins J, Tranter J and Gunn J. 1999. Agricultural land-use effects on the indicator bacterial quality of an upland stream in the Derbyshire peak District in the UK. Water Res 33, 3577-3586.

Kim JB, Chang DS, Kim YH, Kang CK and Cho KD. 2003. Seasonal variation in abundance and species composition of fishes collected by a beam trawl around Narodo, Korea. J. Kor. Fish. Soc 36, 378-388.

KMA (Korea Meteorological Administration). 2009. Response plan of water resource policy in climate change. Climate change news letter 7, 1-35.

Lee K, Baek HJ, Cho CH and Kwon WT. 2011. The recent (2001-2010) changes on temperature and precipitation related to normals (1971-2000) in Korea. Geogra J Kor 43, 497-514.

Lee MO. 1994. Numerical model experiments on the tidal cur-

- rent variations due to the bridge piers construction near the straits of Narodo islands. Bull Kor Fish Soc 27, 47-58.
- Lee TS, Oh EG, Yu HD, Ha KS, Yu HS, Byun HS and Kim JH. 2010. Impact of rainfall events on the bacteriological water quality of the shellfish growing area in Korea. Kor J Fish Aquat Sci 43, 406-414.
- Mallin MA, Esham EC, Williams KE and Nearhoof JE. 1999. Tidal stage variability of fecal coliform and chlorophyll a concentrations in coastal creeks. Mar Pollut Bull 38, 414-422.
- MIFAFF (Ministry of Food, Agriculture, Forestry and Fisheries). 2012. Korean Shellfish Sanitation Program, Ministry of Food, Agriculture, Forestry and Fisheries.
- Oh EG, Yoo HD, Yu HS, Ha KS, Shin SB, Lee TS, Lee HJ, Kim JH and Son KT, 2012. Removal of fecal indicator bacteria from bivalves under natural and electrolyzed water. Kor J Fish Aquat Sci 45, 11-16.
- Park K, Jo MR, Lee HJ, Kwon JY, Son KT and Lee TS. 2011. Evaluation of the effect of the discharged water from Bong stream after rainfall events on the bacteriological water quality in Gangjinman, Korea. Kor J Fish Aquat Sci 44, 622-629.
- Potasman I, Paz A and Odeh M. 2002. infectious outbreaks associated with bivalve shellfish consumption: A worldwide perspective. Clin Infect Dis 35, 921-928.
- Sayler GS, Nelson JD, Justice A and Colwell RR. 1975. Distribution and significance of fecal indicator organisms in the upper Chesapeake Bay. Appl Microbiol 30, 625-638.
- Son NT and Fleet GH. 1980. Behavior of pathogenic bacteria in the oyster, *Crassostrea commercialis*, during depuration, relaying and storage. Appl Environ Microbiol 40, 994-1002.
- U.S. Food and Drug Administration. 2009. National Shellfish Sanitation program, Guide for the control of molluscan shellfish, Model ordinance. Retrieved from <http://www.fda.gov/Food/Foodsafety/Product-SpecificInformation/Seafood/FederalStateprograms/NationalShellfishSanitation-Program/default.htm>. on July 13.