

동해 울산만에서 계절적 강우변화와 담수기원 오염원이 염분구배 및 유역별 대장균 분포에 미치는 영향

이민지, 백승호*
한국해양과학기술원 남해특성연구센터

Distributional characteristics of *Escherichia coli* based on seasonal rainfall variations and extension of freshwater pollutant sources by salinity gradients at Ulsan Bay of Korea facing East Sea

Minji Lee, Seung Ho Baek*

South Sea Research Institute, Korea Institute of Ocean Science & Technology

요약 울산만에서 강우에 의한 염분구배 및 환경요인이 분변계 대장균의 계절적, 지역적 분포에 미치는 영향을 파악하기 위해, 2013년 2월부터 2015년 11월까지 계절 조사를 총 12회 수행하였다. 아울러 울산만 내측과 외측의 염분구배 및 지리적 특성을 기반으로 13개 정점을 3개의 구역(I, II, III)으로 나누어 평가하였다. 조사기간 중 수온과 염분은 각각 8.5-26.1°C와 13.5-34.4 psu의 범위, 엽록소-*a*는 0.4-74.0 $\mu\text{g L}^{-1}$, 투명도는 0.5-10.0 m로 변화하였다. 특히 염분농도는 2014년 춘계, 하계, 추계 울산만 내측의 구역 I에서 낮은 농도로 관찰되었고, 만 외측의 구역 III으로 갈수록 증가하였다 (one-way ANOVA, $p < 0.05$). 아울러, 해역의 염분구배는 대장균의 분포에도 영향을 미쳤고, 특히 태화강의 영향을 강하게 받는 구역 I에서 가장 높게 관찰되었고, 다음으로 구역 II, 구역 III순으로 나타났다. 대장균 개체수는 투명도($r = -0.36$; $p < 0.05$)와 더불어 염분과 음의 상관성($r = -0.53$; $p < 0.01$)이 확인되었고, 이는 육상기원의 대장균이 해역으로 유입될 경우 염분이 낮은 환경에서 보다 유리하게 증식한다는 것을 의미한다. 결과적으로 울산만 내만에서는 잦은 집중강우(< 50 mm)로 인한 육상기원 오염원이 하천 및 태화강으로 유입되어 울산만 최내측인 구역 I에서 현저하게 영향을 미쳤고, 염분구배에 따라서 대장균 개체수도 희석되어 만 외측으로 향할수록 낮게 나타나는 것을 파악하였다.

Abstract In order to understand the seasonal and geographical characteristics of environmental factors and distribution of *Escherichia coli* by salinity gradient due to precipitation, we investigated abiotic and biotic factors during four seasons from February 2013 to November 2015. The study area was divided into three different zones based on salinity gradient and geo-oceanographic characteristics. During the study period, water temperature, salinity, Chlorophyll *a*, and secchi-depth varied in the range of 8.5-26.1°C, 13.5-34.4 psu, 0.4-74.0 $\mu\text{g L}^{-1}$, and 0.5-10.0 m, respectively. Salinity was low at Zone I, which was influenced by water flux from Tae-hwa River, especially in 2014. Salinity was gradually increased (one-way ANOVA; $p < 0.05$) toward Zone III located offshore of the bay. The highest colony form of *E. coli* was detected at Zone I. *E. coli* maintained a relatively low level at Zone III during all seasons. *E. coli* was correlated with transparency ($r = -0.36$; $p < 0.05$) and salinity ($r = -0.53$; $p < 0.01$), implying that those parameters might play important roles in the proliferation of *E. coli*. These results indicated that *E. coli* were strongly affected by frequent rain (< 50 mm) around inner stations in Ulsan Bay of Korea.

Keywords : Gwangyang Bay, *Escherichia coli*, water pollution, environmental factors, water quality

본 논문은 해양수산부의 연구과제 "독도의 지속가능한 이용연구 [PG49260]사업"과 미래창조과학부 해양극지기초원천기술개발사업 [NRF-2016M1A5A1027456]의 지원을 받아 수행된 연구임.

*Corresponding Author : Seung Ho Baek (Korea Institute of Ocean Science & Technology)

Tel: +82-55-639-8513 email: baeksh@kiost.ac.kr

Received December 19, 2016

Revised February 17, 2017

Accepted April 7, 2017

Published April 30, 2017

1. 서론

세계적으로 연안내만 및 항만유역에서는 인구가 늘어나면서 경제시설이 기하급수적으로 증가하는 추세이고, 이와 더불어 기후변화와 같은 다양한 압력이 가중되고 있는 실정이다. 우리나라에서도 1960년대 이후 부산, 마산, 포항, 울산, 여수광양만의 도시화와 산업화가 두드러지게 나타났고, 이로 인해 연안내만해역으로 유입되는 생활오수 및 산업 폐수량이 기하급수적으로 증가해 왔다. 이에 따른 연안해역의 오염부하량의 누적 증가로 환경수용능력이 초과되어 연안생태계의 자연 치유기능을 잃어가고 있다.

울산만은 동해 쪽으로 열려있는 반폐쇄적인 만으로 해안선 전체 길이가 58 km, 항내수면적은 116 km²로 이루어졌다. 만의 남동쪽으로는 쿠로시오의 지류인 대마난류의 영향을 받아 외해수가 유입되고, 북쪽의 태화강과 서쪽 아래의 고사천과 외항강으로부터 담수가 유입된다. 집중강우 시에는 태화강을 중심으로 유입되는 많은 양의 담수는 만 전체에 걸쳐 저염분화와 더불어 유기/무기오염물질의 공급을 증가시킨다. 울산만은 1962년 특정공업지역으로 지정된 이후 중공업, 조선, 기계, 석유화학, 비철금속 산업 등이 급속도로 발달되어 왔으며, 현재에는 이들 산업단지와 함께 울산만을 따라 울산석유화학단지가 조성되어 있다. 특히 울산시와 온산시 인근 지역에서 배출되는 막대한 양의 생활하수 및 공업폐수는 만 내 해양오염의 부하량을 증가시키고 있다. 따라서 국가에서는 2000년부터 특별관리해역으로 지정하여 내만의 환경개선을 위해 많은 예산을 투입시켜 태화강 및 만 내측의 수질이 단계적으로 개선되었다. 하지만, 온산단지 및 외항강 하구의 수질개선 정도는 크지 않을 뿐만 아니라 유해화학물질과 중금속에 의한 퇴적물 오염이 여전히 높게 관측되고 있다[1]. 특히 울산만은 국제무역항구로서 수많은 선박이 왕래하고 대량의 화물을 선적 및 하역하면서 선박평형수를 방출하고 있어, 외래기원의 다양한 미소생물과 함께 유기/무기오염원에 노출될 가능성이 높은 해역이다.

울산만으로 연결되는 태화강 하구역은 담수와 해수가 혼합되어 염분의 변화가 심한 곳이다. 따라서 하구역에 서식하는 생물들은 다양한 환경변화에 따른 영향을 받게 된다. 특히 태화강을 포함한 울산만으로 흘러들어오는 생활하수 및 공업용 폐수의 증가로 인하여 담수기원으로

부터 사람이나 가축으로부터 배설된 분변계 대장균 오염의 영향을 쉽게 받을 수 있는 지정학적 특징을 가지고 있다. 이러한 하천, 생활하수, 선박기원의 오염원에는 항균제 내성균이 함유되어 있을 가능성이 높다.

우리나라 해역에서 일반세균을 포함한 분변계 오염물질을 조사한 선행연구로는 여수연안 및 동중국해[2], 수영만[3, 4], 광양만과 진해만[5, 6], 부산만[7] 등이 있다.

울산만은 해안선이 길어 생활하수 및 공업용 폐수에 의한 다양한 오염원에 노출되기 쉬운 환경이지만, 외양으로부터 해수순환이 원활하여 특정 오염물질이 빠르게 희석 및 정화될 수 있는 해양환경특성을 지녔다. 따라서 본 연구에서는 계절적 강우의 변동과 해역의 염분구배에 따른 환경특성에 의한 분변성 오염물질의 거동을 파악하기 위해서 울산만에서 2013년에서 2015년까지 3년에 걸쳐 대장균 (*Escherichia coli*)의 해역별 및 계절적 특성을 조사하였다. 본 연구 결과는 울산만의 해역별 수질오염 특성 이해와 함께 오염원에 따른 해양수질환경 관리를 위한 기초 자료로 활용될 수 있다.

2. 재료 및 방법

본 연구에서는 울산만의 지리적 특성에 따른 분변성 대장균(*E. coli*)의 오염특성을 살펴보기 위해서, 2013-2015년 동안 13개 정점에서 2, 5, 8, 11월의 계절 조사를 총 12회 수행하였다. 또한 울산만의 지리적 특성에 맞추어 구역(Zone)을 I, II, III 3개로 나누어 평가하였다(Fig. 1). 구역 I은 태화강 하구역의 영향을 강하게 받는 유역(정점1, 2, 3, 4). 구역 II는 온산단지 및 만의 중간수역으로 내만과 외양을 영향을 동시에 받는 유역(정점 5, 6, 9, 10, 11), 구역 III은 상대적으로 외양의 영향을 강하게 받아 비교적 오염도가 낮고 해수교환이 원활한 해역이다(정점 7, 8, 12, 13). 조사는 현장에서 수온과 염분을 CTD(IDRONUT Ocean Seven 319, USA)로 측정하였고, 아울러 현장해수의 현장투도를 파악하기 위해서 투명도판(Secchi disc)으로 투명도를 측정하였다. 아울러 대장균(*E. coli*)군수를 산출하기 위해서 각각 정점에서 버킷으로 표층수를 채수하여 200 μm의 mesh로 야광충, 동물플랑크톤 및 대형오염물을 제거하고 1L 무균채수팩에 넣어 냉암소에 보관하여 실험실로 운반하였다. 엽록소-*a* 농도 측정을 위해서 표층수 250-1000 mL를

선상에서 GF/F필터(47mm Whatman glass fiber filters)로 여과하였고, 그 필터는 15 mL 튜브에 넣어 냉동보관하였다. 엽록소-a농도는 냉동 보관한 여과지를 90% acetone에 넣고 24시간 냉암소에서 엽록소를 추출한 후 형광측정기(Turner Designs 10-AU Fluorometer)로 분석하였다[8].

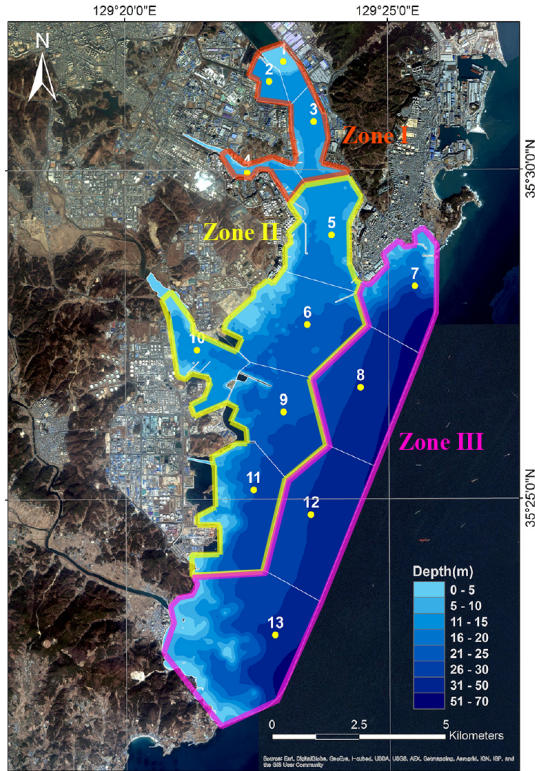


Fig. 1. Map of the Ulsan Bay showing sampling stations. Blue gradient colors indicate water depths. We divided into three different areas based on regional geo-oceanographic environments.

대장균균수는 다음과 같은 실험순서로 진행하였고, 모든 실험장비는 무균처리(Autoclave, 120°C)한 후 clean bench 에서 수행하였다[5]. 또한 매번 실험시 무균 처리된 증류수로 대조구를 만들어 실험환경 중 오염여부를 확인하였다. 실험실로 운반된 1 L 무균 채수병의 시료를 교반한 후 40 mL와 80 mL로 정량하여 각각 Membrane filter(0.2 µm pore size)로 여과하였다. 냉장 보관된 대장균균용 Petrifilm EC plate(3M, USA)은 사용하기 2-3시간 전 clean bench에 두고 난 후 사용하였다. Petrifilm EC plate 의 윗커버를 들어 붉은색 배지 위

에 멸균증류수 1 mL을 넣고, 윗커버를 덮고 난 후 Plastic spreader의 평평한 면으로 살짝 눌러 배지를 균일하게 적셔 주었다. 그 후 Petrifilm EC plate 의 윗커버를 들고 시료를 여과한 Membrane filter를 붉은색 배지 위에 올린 후 기포가 생기지 않게 조심스럽게 덮었다. 평판배양법으로 접종된 Petrifilm EC plate 을 항온배양기(암조건, 35°C)에서 배양 하였다. 대장균균체는 48시간 후에 사진촬영을 병행하여 계수하였고, cfu L⁻¹로 환산하였다. 각 해역별 오염원의 기원을 알아보기 위해서 환경요인과의 상관관계를 통계 프로그램 XLSTAT2010 (AddinSoft™)로 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

울산지역에서 조사 기간 3년 동안 일강우량의 발생빈도(> 10 mm)는 2013년과 2015년이 높게 나타났으나, 조사 5일전의 누적 강우량은 2014년에 높았다(Fig. 2).

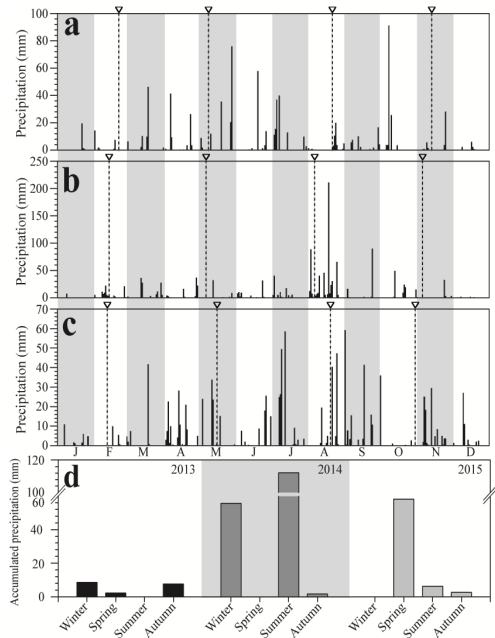


Fig. 2. Daily precipitation in Ulsan Bay in 2013(a), 2014(b) and 2015(c); Dotted line indicates sampling date. Accumulated precipitation(d) for 5 days before sampling from 2013 to 2015.

누적 강우량은 2013년 859 mm로 가장 낮게 나타났으나, 비교적 춘계와 추계에 빈번하게 강우가 관찰되었다.

2014년의 누적 강우량은 1399 mm로 높았으며, 특이적으로 하계 200 mm이상의 큰 강우가 1회 관찰되었다. 2015년의 누적 강우량은 1044 mm로 2014년보다 약간 적었으나, 춘계와 하계에 빈번한 강우가 관찰되었다. 이와 같은 강우가 울산만 해역의 조사 시기에 미치는 영향을 파악하기 위해 조사 전 5일간의 누적 강우량을 산출하였으며, 그 결과 2014년 동계와 하계 각각 55.7 mm와 112 mm로 기록되어 현저히 높게 나타났다. 특이적으로 2015년에는 춘계 58.2 mm에 달하는 누적강우량이 관측되어, 울산만 해역에 직접적으로 영향을 미친 것으로 판단된다. 강우에 의하여 발생하는 육상담수기원의 부유 현탁물질은 영양염류뿐만 아니라 분변계 대장균을 해역으로 운반하는 중요한 매개체로 작용함으로[9], 대장균과 환경인자간의 상관성 분석의 토의에서 상세하게 언급된다.

울산만의 표층 수온은 8.5-26.2℃로 변동하였고, 2013년-2015년의 3년 표층 평균 수온은 구역 I, II, III에서 각각 동계 9.9℃, 10.9℃, 11.9℃로, 춘계 15.4℃, 14.4℃, 14.2℃로, 하계 22.8℃, 23.4℃, 22.3℃로, 추계 17.8℃, 18.3℃, 18.6℃로, 전형적인 온대 해역의 계절별 수온 분포특성을 보였다(Fig. 3). 해역별 표층수온은 수심이 얇은 울산만의 내측 구역 I에서 동계와 추계를 중심으로 낮게 관찰되었고, 반대로, 춘계에는 오히려 높게 나타났다. 하계에는 중간 수역인 구역 II에서 상대적으로 높게 나타났고, 외측 구역 III에서는 수심이 깊어 계절에 따른 변화폭이 상대적으로 적었다. 연도별 수온 변화폭은 유사한 경향을 보였으나, 해역별 차이는 구역 I과 구역 III에서 유의하게 나타났다(Table 1; one-way ANOVA; $p < 0.05$). 특히 하계에는 수심이 얇은 내측(구역 I)에서 외측(구역 III)과 비교하여 수온이 높았으나, 특이적으로 2014년은 구역 III에 다른 조사년도보다 수온이 크게 떨어진 19.7℃을 보였다. 이는 2015년도와 비교하여 5℃의 차이를 보였고, 이와 같은 명확한 하계 표층수온의 차이는 연안용승(coastal upwelling)효과의 가능성이 높다. 즉 우리나라 남서쪽 해안인 동해 부산, 기장, 울산해역에서는 하계 남서풍 계열의 바람이 지속적으로 불면 지형적 조건과 결합하여 표층해수가 바깥쪽으로 유출되어 질량보존법칙에 의해 심층의 해수가 표층으로 공급되어 저층의 낮은 수온이 표층에서도 관찰된다[10, 11]. 결과적으로 울산만의 연안용승은 2014년도에 강하게 나타나고, 그 효과에 따라서 외측을 중심으로 저층수온(구역

III: 12.3℃) 뿐만 아니라 표층수온(구역 III: 19.7℃)이 하계의 다른 조사시기보다 현저하게 낮게 관찰된 것으로 파악되었다.

Table 1. Seasonal trends of average water temperature in three different zones from 2013 to 2015 during four seasons in Ulsan Bay; Units: °C

Season	Year	Zone			F
		I	II	III	
Winter	2013	10.5±0.36 ^b	10.9±0.25 ^b	11.9±0.51 ^a	14.24 [*]
	2014	10.2±0.78 ^b	11.3±0.71 ^b	12.8±0.75 ^a	12.91 ^{**}
	2015	9.1±0.59 ^b	10.3±0.67 ^a	10.9±0.06 ^a	12.65 ^{**}
Spring	2013	15.6±0.59 ^a	14.3±0.52 ^b	14.5±0.39 ^b	7.43 [*]
	2014	14.8±0.38 ^a	14.2±0.20 ^b	13.9±0.32 ^b	9.51 ^{**}
	2015	15.9±0.42 ^a	14.5±0.69 ^b	14.2±0.27 ^b	12.92 ^{**}
Summer	2013	20.7±1.26 ^a	23.8±1.18 ^a	21.0±1.92 ^a	4.28 [*]
	2014	22.7±1.20 ^a	20.5±0.95 ^b	19.7±0.45 ^b	11.66 ^{**}
	2015	25.0±0.09 ^b	25.8±0.32 ^a	26.0±0.16 ^a	24.02 ^{***}
Autumn	2013	16.9±0.22 ^b	17.7±0.66 ^a	18.0±0.13 ^a	7.83 ^{**}
	2014	18.9±0.45 ^a	19.1±0.31 ^a	19.0±0.10 ^a	0.44 ^{N.S.}
	2015	17.8±0.26 ^a	18.0±0.59 ^a	18.7±0.61 ^a	3.50 ^{N.S.}

Data show the mean ± S.D. Results were analyzed by one-way ANOVA based on the Tukey's post hoc test. Letters (a, b) represent significant differences; N.S., not significant, *** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$

Table 2. Salinity variations in each zone from 2013 to 2015 during four seasons in Ulsan Bay; Units: psu

Season	Year	Zone			F
		I	II	III	
Winter	2013	32.8±0.45 ^b	33.7±0.40 ^a	34.0±0.26 ^a	10.63 [*]
	2014	30.1±3.73 ^b	33.8±0.45 ^{ab}	34.3±0.15 ^a	5.07 [*]
	2015	32.7±0.48 ^b	33.9±0.41 ^a	34.1±0.32 ^a	14.17 ^{**}
Spring	2013	32.2±0.96 ^b	33.6±0.31 ^{ab}	33.9±0.15 ^a	9.97 ^{**}
	2014	28.9±3.63 ^b	33.5±0.60 ^a	34.2±0.11 ^a	8.29 ^{**}
	2015	21.3±6.29 ^a	27.2±6.47 ^a	29.8±6.90 ^a	1.78 ^{N.S.}
Summer	2013	31.5±1.12 ^b	32.2±0.42 ^{ab}	33.1±0.39 ^a	5.06 [*]
	2014	20.5±5.06 ^b	29.5±1.42 ^a	31.4±0.20 ^a	16.21 ^{**}
	2015	30.2±0.14 ^b	31.3±0.26 ^a	31.5±0.03 ^a	64.66 ^{***}
Autumn	2013	32.8±0.26 ^b	33.6±0.24 ^a	33.8±0.08 ^a	24.44 ^{***}
	2014	29.2±2.80 ^b	32.6±0.46 ^a	32.8±0.26 ^a	7.18 [*]
	2015	31.0±0.40 ^b	32.5±0.25 ^a	32.5±0.14 ^a	36.19 ^{***}

Data show the mean ± S.D. Results were analyzed by one-way ANOVA based on the Tukey's post hoc test. Letters (a, b) represent significant differences; N.S., not significant, *** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$

울산만의 표층 염분은 13.5-34.4 psu로 변동하였고, 2013-2015년의 염분의 구역별 평균은 구역 I, II, III에서 각각 동계 31.9 psu, 33.8 psu, 34.1 psu로, 춘계 27.5 psu, 31.4 psu, 32.7 psu로 나타났다(Fig. 3). 하계에는

구역 I에서 27.4 psu로 낮게 관찰되었고, 구역 II과 구역 III에서 각각 31.0 psu와 32.0 psu로 관찰되었으며, 특히 외측해역으로 갈수록 염분이 단계적으로 높아져 구역별로 염분구배가 뚜렷하게 나타났다. 추계에는 구역 I에서 30.2 psu로, 구역 II에서 32.9 psu로, 구역 III에서 33.0 psu로 나타났다. 3년의 관측기간 동안 표층의 염분은 태화강 담수유입의 영향을 강하게 받는 구역 I이 현저하게 낮게 나타났고, 특히 2014년 춘계와 2015년 하계에 구역 I에서 20 psu 전후의 낮은 염분이 관찰되었다. 일원분산(one-way ANOVA)분석 결과, 모든 계절 내측 구역 I과 외측 구역 III에서 유의한 염분의 차이를 보였다 (Table 2; $p < 0.05$). 염분변화는 계절적 강우의 영향을 강하게 받았으며, 울산만의 염분은 태화강 담수량의 증가와 더불어 구역에 따른 염분구배의 명확한 차이를 보였다. 특히, 염분농도는 내측에서 외측으로 향하는 구역 III > 구역 II > 구역 I 순으로 높게 나타났다.

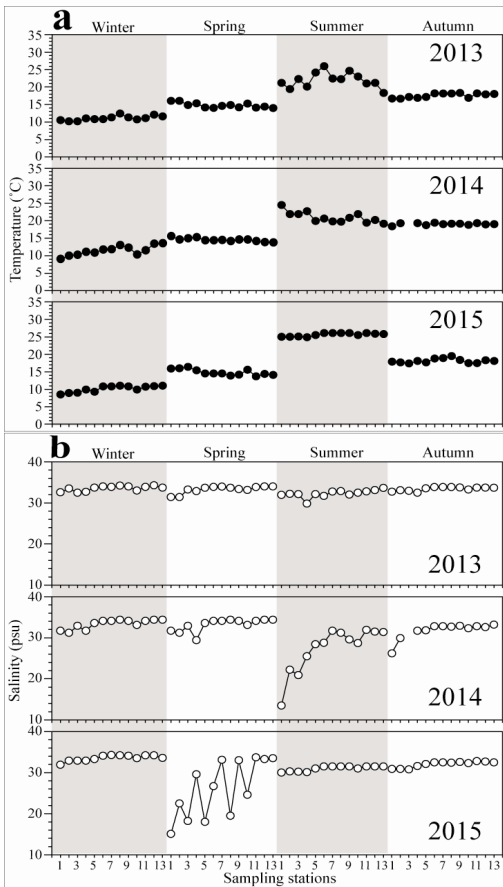


Fig. 3. Seasonal changes in water temperature (a) and salinity (b) in Ulsan Bay.

조사기간 중 총 엽록소-a 농도는 0.37-74.0 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 큰 변동 폭을 보였다. 2013년 동계, 춘계, 하계, 추계 순으로 각각 0.68 $\mu\text{g L}^{-1}$, 6.85 $\mu\text{g L}^{-1}$, 12.3 $\mu\text{g L}^{-1}$, 1.21 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 나타났고, 동계와 추계에는 매우 낮은 값을 보였다. 특히, 2013년 하계에 내측 정점 4에서 최대 46.7 $\mu\text{g L}^{-1}$ 에 달하는 높은 값을 보였으며, 외측으로 갈수록 감소하였다. 2014년의 평균 엽록소-a 농도는 동계, 춘계, 하계, 추계에 각각 0.61 $\mu\text{g L}^{-1}$, 1.18 $\mu\text{g L}^{-1}$, 1.06 $\mu\text{g L}^{-1}$, 1.94 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 나타났다. 특히, 2014년에는 정점별 엽록소-a값의 차이는 보였으나, 모든 조사계절 5 $\mu\text{g L}^{-1}$ 를 초과하지 않았다. 2015년에는 계절별 각각 하계 (11.4 $\mu\text{g L}^{-1}$) > 춘계(10.9 $\mu\text{g L}^{-1}$) > 추계(3.79 $\mu\text{g L}^{-1}$) > 동계(1.24 $\mu\text{g L}^{-1}$) 순으로 높게 나타났고, 특히 하계 최대 74.0 $\mu\text{g L}^{-1}$ (정점 12)에 달하는 극히 높은 엽록소-a 농도를 기록하였다(Fig. 4).

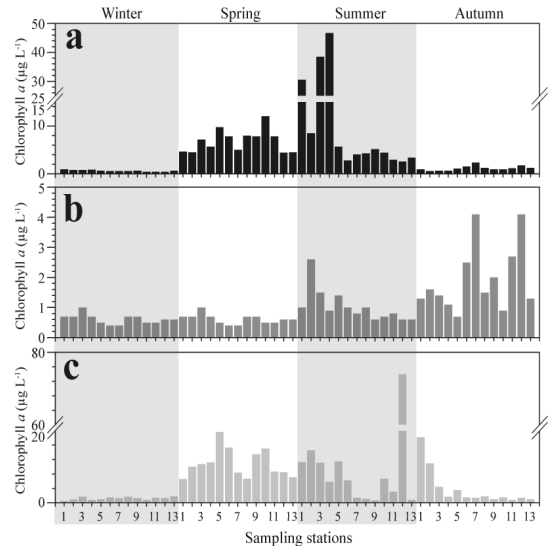


Fig. 4. Seasonal changes in Chl-a concentration at the surface of each sampling stations in Ulsan Bay; 2013(a), 2014(b) and 2015(c).

울산만에서 투명도는 2013년 동계 외측 구역 III의 정점 8(7.5 m)과 12(6.8 m)에서 높게 나타났고, 춘계, 하계, 추계에는 정점간의 차이가 크지 않았고 약 3-4 m로 유지되었다. 2014년과 2015년에도 전반적으로 유사한 계절적 경향을 보였으나, 2015년 하계에는 구역 II의 일부 정점을 중심으로 높게 나타나는 특색을 보였다(Fig. 5). 전반적으로 수심이 얇고 육상으로부터 부유물 유입이 많은 내측의 투명도는 2013년과 2014년에 낮게 나타

나는 특성을 보였고, 2015년에는 반대로 외측정점에서 낮게 나타났다.

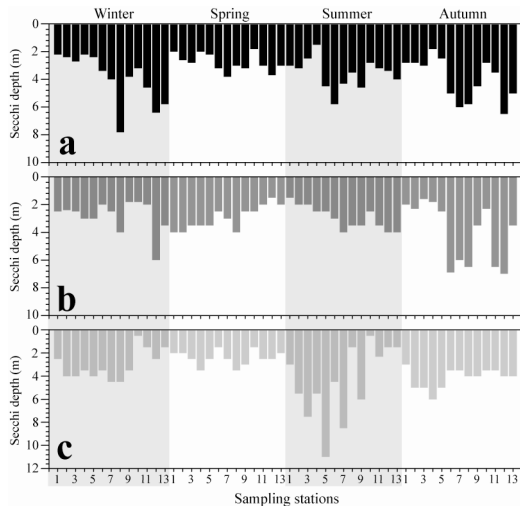


Fig. 5. Seasonal variation of water transparency by secchi disc at each sampling stations in Ulsan Bay; 2013(a), 2014(b) and 2015(c).

울산만에서 분변계 대장균의 변화는 조사년도에 따라서 뚜렷한 차이를 보였고, 개체수 밀도는 2015년 > 2014년 > 2013년 순으로 높게 나타났다(Fig. 6). 2013년 정점 1에서 춘계와 추계 각각 1050 cfu L⁻¹와 825 cfu L⁻¹로 높은 값을 보였으나, 그 외 정점 및 계절에서는 낮은 개체수를 보였고, 특히 외측 구역 III에서는 대장균 개체수가 거의 출현하지 않았다. 여기서 2013년 춘계와 추계 최 내측에서만 높은 대장균 개체수가 관찰된 원인은 명확하게 파악할 수 없었지만, 빈번한 강우가 최 내측인 정점 1에 영향을 미친 것으로 사료된다. 2014년의 해역별 대장균의 분포 경향은 2013년과 유사하게 내측인 구역 I에서 높은 대장균수를 보였고 구역 III에서는 극히 낮게 관찰되었다. 특이적으로 동계 구역 I에서 평균 1209 cfu L⁻¹에 달하는 높은 개체수를 보였고, 이는 동계 조사 전 5일간 누적 강우량이 55.7 mm로 높게 나타나, 강우에 의한 육상으로부터 유입된 담수기원의 대장균이 구역 I을 거쳐 구역 II까지 일정량 영향을 미친 것으로 사료된다. 2014년 하계에는 조사 전 누적 강우량이 100 mm 이상으로 극히 높게 나타났으나, 분변성 대장균 밀도는 크게 높지는 않았다. 동일 연구진에 조사결과에 의하면, 울산만 하계 식물플랑크톤의 분포의 해역별 분포특성은 내측뿐만 아니라 외측까지 담수종이 출현하는 것으로 보아

담수의 영향이 구역 III까지 미친 것과 상반되게 분변계 대장균의 광역화 현상은 명확하지 않았다[12]. 이는 빈번한 강우가 아닌 조사 전 5일 이내 100 mm 이상의 큰 일회성 강우는 오히려 분변성 대장균의 유입 또는 집적에 긍정적인 영향을 미치지 않는 것으로 사료된다. 2015년 춘계 정점1(구역 I)에서 대장균의 최고치(7437 cfu L⁻¹)가 관찰되었고, 구역 I뿐만 아니라 구역 II까지 높은 개체수가 관찰되었는데, 이 역시 2014년 동계의 결과와 유사하게 강우량이 크지 않았고 빈번한 강우의 특성과 조사 5일 전의 누적강우량이 58.2 mm로 관찰되었다. 아울러 2015년에는 빈번한 강우의 영향으로 하계와 추계에도 구역 I에서는 평균 2016 cfu L⁻¹와 1706 cfu L⁻¹에 달하는 높은 개체수를 보인 것으로 사료된다.

조사 구역별로 대장균수의 평균값을 비교해보면(Fig. 7), 2015년 동계를 제외하고 전 조사 기간 동안 구역 I에서 높은 분변성 대장균 밀도를 보였으나, 통계적으로는 유의한 차이를 확인할 수 없었다(one-way ANOVA; $p > 0.05$). 이와 같은 통계 결과는 구역 I이 명확하게 높은 대장균수를 보였음에도 불구하고, 각 정점별 편차로 인하여 통계적 유의하지 않은 것으로 판단되었다. 반면, 통계적으로 구역 I과 구역 III의 유의한 차이를 보인 시기는 2013년 하계, 2014년 동계, 2015년 춘계 및 하계로 나타났다($p < 0.05$). 이와 같이 통계적으로 유의한 차이를 보인 시기에는 구역 I의 내측 정점에서 높은 대장균수가 균등하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이는 앞서 언급한 것과 같이 빈번한 일정한 높은 강우(ca. 50 mm) 후, 해역의 환경특성이 대장균이 증식하기에 좋은 조건이 형성된 것으로 판단된다.

조사기간 3년 동안 대장균의 출현분포와 환경요인과의 관계를 분석한 결과(Table 3), 수온과 염분의 상관계수는 음(-)의 상관성을 보였으며 ($r = -0.25$; $p < 0.01$), 수온과 엽록소-a는 양의 상관성을 보였다 ($r = 0.27$; $p < 0.01$). 이는 춘계와 하계를 중심으로 강우가 빈번한 시기에 울산만의 염분농도가 현저하게 떨어지는 것을 의미하고, 동계의 낮은 수온조건에서는 식물플랑크톤의 성장이 활발하지 않아, 낮은 엽록소-a가 관찰된 반면, 춘계와 하계에 수온증가와 더불어 엽록소-a 값이 증가한 결과 수온과 엽록소-a 사이에 양(+)의 상관성이 관찰된 것으로 파악된다. 아울러, 엽록소-a는 염분과도 일정한 음의 상관성을 확인하였다 ($r = -0.16$; $p < 0.05$). 대장균은 수온과 엽록소-a와는 유의한 상관성이 확인되지

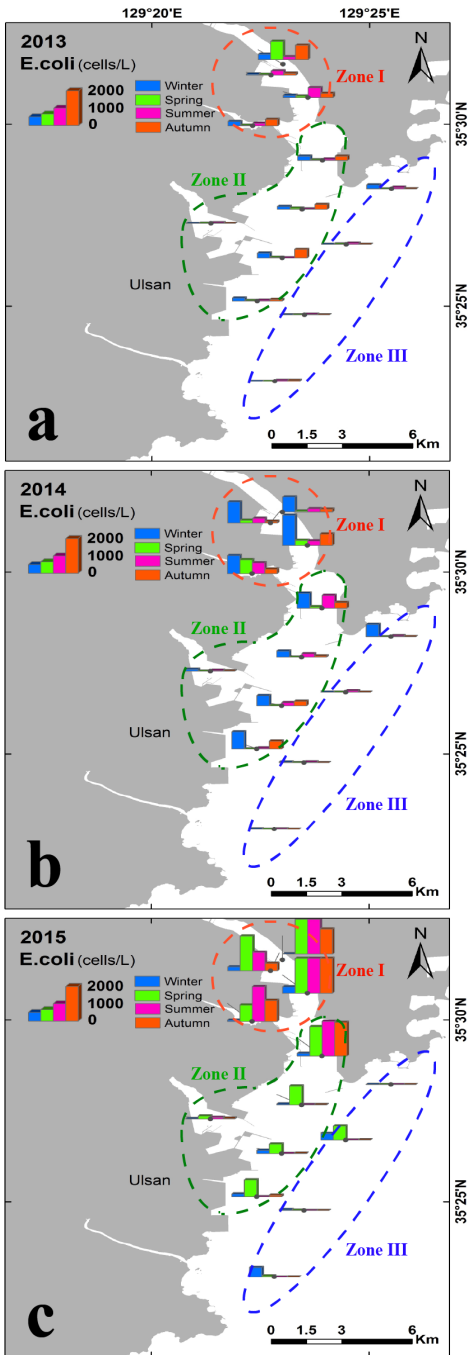


Fig. 6. Seasonal variations of *Escherichia coli*(cfu L⁻¹) during three years at the surface layers in Ulsan Bay.

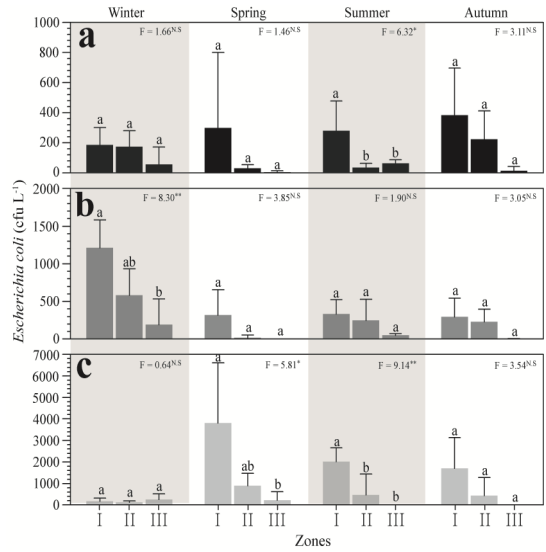


Fig. 7. Distributional characteristics in three different zone of *Escherichia coli* (cfu L⁻¹) during four seasons from 2013 to 2015 at the surface of Ulsan Bay. Results were analyzed by one-way ANOVA based on the Tukey's post hoc test. Letters (a, b) represent significant differences; N.S., not significant, *** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$

않았지만 ($p > 0.05$), 염분과는 높은 음의 상관성을 확인하였다 ($r = -0.53$; $p < 0.01$). 결과적으로 울산만 대장균의 분포특성은 강우에 의한 담수기원의 오염물질이 일정량 해수유역으로 유입될 때 울산만 내측에서 외측으로 향하는 정점으로 염분구배가 형성되고, 이와 같은 염분구배는 대장균 개체수 밀도구배 현상에도 현저하게 영향을 미치는 것으로 파악되었다. 국외에서도 분변성 대장균은 강우에 따른 염분의 변화에 따라서 영향을 받아 개체수가 급격하게 증가한다는 보고가 다수 있으며[13, 14] 국내에서도 부산 연안해역에서는 낙동강의 영향으로, 광양만 인근해역에서는 섬진강의 영향으로, 진해만과 마산만 연안일대에서는 크고 작은 하천수의 영향으로 육상기원의 대장균이 집중호우에 의하여 내만해역의 저염분화된 호조건의 환경 하에서 기하급수적으로 증식하여 일정하게 높은 개체수밀도를 나타내는 것으로 확인되었다[5, 6, 7]. 결과적으로 울산만에서 분변성 대장균의 변화는 계절적 수온변화보다 강우에 의한 염분의 영향을 보다 크게 받는 것으로 파악되었다. 이와 같은 결과는 해역의 오염원을 관리하는 정책을 결정할 때 계절적 담수 유입 및 해역의 확산경로를 면밀하게 검토할 수 있는 중요한 근거자료로 활용 가능 할 것으로 기대된다.

Table 3. Pearson's correlation between environmental parameters and *Escherichia coli* at surface layer in Ulsan Bay.

Variable	Temp.	Sal.	Chl. a	S.D.
Sal.	-0.25**			
Chl. a	0.27***	-0.16*		
S.D.	0.26**	0.28***	-0.25**	
<i>E. coli</i>	0.04	-0.53***	0.13	-0.36***

Bold indicates significant value (***) p<0.001, ** p<0.01, * p<0.05). S.D.: water transparency by secchi disc.

4. 결론

울산만에서 분변계 대장균의 분포는 내만인 구역 I에서 높게 나타났고, 외측인 구역 III에서 낮게 관찰되었다. 아울러, 태화강의 영향으로 강우로 인한 육상기원의 대장균이 울산만 내측으로 유입되어 외측으로 향하면서 희석 정화되어 점차적으로 감소하는 경향을 명확하게 파악하였다. 특히, 일회성 집중강우보다 빈번한 강우로 육상기원의 오염물질을 일정하게 해역으로 옮겨오는 빈도를 높이는 것은 해역의 대장균 확산뿐만 아니라 높은 개체수 밀도를 유지하는데 중요하게 작용되는 것으로 파악되었다. 이는 울산시 도시하천 및 공업화 단지로부터 잦은 강우에 의하여 육상기원 오염물질 및 분변계 대장균이 해역으로 빈번하게 유입된다는 것을 의미한다. 따라서 이와 같은 육상기원의 오염물질이 해역으로 유입 및 확장되는 것을 최소화하기 위한 연안해역 관리 방안 및 대책이 필요할 것이다.

References

[1] C. H., Koh, J. S. Khim, D. L. Villeneuve, K. Kannan and J. P. Giesy, "Analysis of trace organic contaminants in sediment, pore water, and water samples from Onsan Bay, Korea; instrumental analysis and in vitro gene expression assay", *Environmental Toxicology and Chemistry*, vol. 21, no. 9, pp. 1796-1803, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1002/etc.5620210906>

[2] K. J. Jung, S. U. Shin, "Bacterial flora of East China Sea and Yosu coastal sea areas I. Horizontal distributions according to number of bacteria. *Vibrio* spp. and coliform group", *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 29, pp. 9-16, 1996.

[3] W. J. Lee, Y. T. Park, M. C. Kim, H. K. Seong, "The environmental factors and coliform group in Suyeong Bay: 1. The environmental factors and coliform group

during summer in Suyeong bay", *Journal of fish pathology*, vol. 4, no. 1, pp. 15-21, 1991.

[4] W. J. Lee, Y. T. Park, W. B. Kang, W. A. Lim, J. H. Lee, "The environmental factors and coliform group in Suyeong Bay : 2 . The environmental factors and coliform group during winter in Suyeong bay", *Journal of fish pathology*, vol. 4, no. 1, pp. 23-30, 1991.

[5] M. H. Son, S. H. Baek, H. M. Joo, P. G. Jang, Y. O. Kim, "Distributional characteristics of *Escherichia coli* and water pollution in Gwangyang Bay and Jinhae Bay, Korea", *The Korean Journal of Environment Biology*, vol. 29, pp. 162-170, 2011.

[6] S. H. Baek, "Distribution characteristics of chemical oxygen demand and *Escherichia coli* based on pollutant sources at Gwangyang Bay of South Sea in Korea", *Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 15, pp. 3279-3285, 2014. DOI: <http://doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.5.3279>

[7] S. H. Baek, M. J. Lee, D. Yoon, "Distributional Characteristics of *Escherichia coli* at Nakdong River Mouth and Busan Coastal Area", *Journal of Marine Life Science*, vol. 1, no. 1, pp. 1-7, 2016.

[8] Parsons TR, Maita Y, Lalli CM, *A manual of biological and chemical methods for seawater analysis*. Publ. Pergamon Press, Oxford, pp. 184 1984.

[9] G. S. Sayler, J. D. Nelson, A. Justice, R. R. Colwell, "Distribution and significance of fecal indicator organisms in the Upper Chesapeake Bay", *Applied Microbiology*, vol. 30, no. 4, pp. 625-638, 1975.

[10] J. C. Lee, "Variations of sea level and sea surface temperature associated with wind induced upwelling in the southeast coast of Korea in summer", *Journal of the Korean Society of Oceanography*, vol. 18, pp. 149-160, 1983.

[11] D. K. Lee, J. I. Kwon, S. B. Hahn, "The wind effect on the cold water formation near Gampo-Ulgi coast", *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 31, no. 3, pp. 359-371, 1998.

[12] M. J. Lee, D. Kim, Y. O. Kim, M. Sohn, C. H. Moon, S. H. Baek, "Seasonal phytoplankton growth and distribution pattern by environmental factor changes in inner and outer bay of Ulsan, Korea", *Journal of the Korean Society of Oceanography*, vol. 21, no. 1, pp. 24-35, 2016.

[13] K. Ogawa, "Some factors affecting the survival of coliform bacteria in seawater", *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, vol. 30, no. 2, pp. 54-60, 1974. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02112893>

[14] H. M. Solo-Gabriele, M. A. Wolfert, T. R. Desmarais, C. J. Palmer, "Sources of *Escherichia coli* in a coastal subtropical environment", *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 66, no. 1, pp. 230-237, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.66.1.230-237.2000>

이 민 지(Minji Lee)

[정회원]



- 2016년 8월 : 부경대학교 해양학과 (이학 석사)
- 2014년 8월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 연구원

<관심분야>

생물해양학, 식물플랑크톤 생태학, 수질, 해양환경

백 승 호(Seung Ho Back)

[정회원]



- 2004년 3월 : 요코하마국립대 환경정보학과 (환경학석사)
- 2007년 3월 : 요코하마국립대 환경정보학과 (환경학박사)
- 2009년 1월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 책임연구원

<관심분야>

해양환경오염, 수질, 해양생물학, 식물플랑크톤 생태학