

광양만과 진해만에서 대장균 *Escherichia coli* 분포와 수질오염 특성

손문호 · 백승호* · 주혜미 · 장풍국 · 김영옥

한국해양연구원 남해연구소

Distributional Characteristics of *Escherichia coli* and Water Pollution in Gwangyang Bay and Jinhae Bay, Korea

Moonho Son, Seung Ho Baek*, Hae Mi Joo, Pung Guk Jang and Young Ok Kim

Korea Ocean Research and Development Institute/South Sea Institute, Geoje 656-830, Korea

Abstract – In order to assess the inorganic and organic pollutants characteristics in marine water, we investigated COD (Chemical Oxygen Demand), Chlorophyll *a* and *Escherichia coli* during four seasons at 20 stations of Gwangyang Bay and at 23 stations of Jinhae Bay, Korea. The bay is divided into three zones in Gwangyang and four zones in Jinhae respectively, based on the pollutant levels. In Gwangyang Bay, the high concentration (mean 4.7 mg L⁻¹) of COD was recorded during spring season at Zone I, which can be characterized as a semi-enclosed eutrophic area (St. 1~9). Also, Chl. *a* concentrations were high at Zone I (mean 14.0 µg L⁻¹). The colony of *E. coli* were detected during summer season at Zone II, which is influenced by Seomjin River water. The *E. coli* may have been entered from the river water in a large pulse during rainy season. On the other hand, *E. coli* was kept low levels during four seasons at the Zone III, which is influenced indirectly by surface water currents from offshore of the bay. In Jinhae Bay, the high COD and Chl. *a* were shown during all seasons at Zone I, which is characterized by semi-enclosed eutrophic area of Masan and Haengam bays. The Zone I also had been shown relatively high *E. coli* concentration in all seasons. In contrast, other three zones did not show seasonal characteristics of the *E. coli* concentrations. The present study suggests that *E. coli* concentrations can be significantly elevated in eutrophic semi-enclosed area.

Key words : water quality, Chlorophyll *a*, COD (Chemical Oxygen Demand), *Escherichia coli*

서 론

도시에 인접한 대부분의 연안해역은 각종 오염물질의 유입으로 수질의 부영양화 현상이 가속화되고 있다. 특히 도시하수의 유입이 많은 연안 내만과 하구역은 해수

의 이동이나 순환이 극히 제한되어 정체현상으로 인한 분변계 대장균의 오염에 노출되기 쉽다(강과 여 2001). 대장균군은 일반적으로 인간과 가축의 분변에서 기인하는 *Escherichia*, *Klebsiella*, *Citrobacter* 등이 있으며, 토양이나 식물에서 기인하는 *Enterobacter*, *Erwinia* 및 분변과 관계없는 *Aeromonas* 등이 있다(김 등 2007).

우리나라에서 일반세균을 포함한 대장균 분포에 관한 연구는 여수 연안 및 동중국해(정과 신 1996), 수영만

*Corresponding author: Seung Ho Baek, Tel. 055-639-8513, Fax. 055-639-8509, E-mail. baeksh@kordi.re.kr

(이 등 1991a, b), 삼천포만(박과 이 2006)에서 환경요인과 미생물상의 관계에 대해서 보고된 바 있다. 또한 이매패류 양식장이 많은 통영과 거제도주변에서 굴에 대한 세균학적 조사가 수행되었다(Yoo *et al.* 1980; Choi *et al.* 1998). 이와 같은 분변계 대장균으로부터 해양 수산물의 철저한 위생관리를 위해서는 그들의 계절적 출현 분포특성과 더불어 발생에 대한 위생대책의 수립이 중요하다(김 등 2005; 김 등 2007).

현행 우리나라 해양환경관리법 제8조에 의하면, 해양환경(생활환경기준)의 상태를 과학적으로 평가할 수 있는 항목은 pH, 화학적산소요구량(Chemical Oxygen Demand: COD), 용존산소, 총대장균군수, 용매추출의 유분, 총질소, 총인 등이 있다. 그 중 해수중의 유기물질은 용존상태의 용존유기탄소와 입자성유기탄소가 공존하며, 이들 입자에는 일반세균이 부착되어 분포한다. 이때 입자성유기탄소는 생물의 체설물뿐만 아니라 살아있는 생물까지 내포하게 된다. 이와 같은 맥락으로 유기물 총량의 개념은 화학적산소요구량(이하 COD)으로 대변할 수 있어 보편적으로 해양환경오염도 평가에 널리 활용되어 왔다.

본 연구는 진해만과 광양만의 수질오염 특성을 살펴보기 위해 대장균 *Escherichia coli*, COD, Chlorophyll *a* (이하 Chl. *a*)를 중심으로 조사하였다. *E. coli*는 육상으로부터 유입되는 분변성 오염물의 분포, COD는 유기오염물의 총량, Chl. *a*는 식물플랑크톤 증식과 관련한 부영양화의 현상을 각각 대변할 수 있으며, 이러한 연구는 광양만과 진해만에 산재되어 있는 양식장주변의 위생관리를 위한 수질환경의 특성을 파악하는 기초적인 자료로 활용 가능할 것이다.

재료 및 방법

1. 조사지 개요

광양만은 남해안에 위치한 반폐쇄성 내만으로 남쪽에 서는 쿠로시오의 지류인 대만난류의 영향을 받아 외해수가 유입되고, 북쪽에서는 섬진강 기원의 담수가 연간 25억 8천만톤이 유입되고 있다(김 1968). 광양만 주변에는 인구가 밀집되어 있고, 만 북부에는 광양제철소가 위치하며, 남부에는 여천국가산업단지가 조성되어 있다. 따라서 강우가 적은 동계에는 만 주변의 생활하수와 공업폐수가 지대한 영향을 미치고, 강우기에는 섬진강으로부터 많은 양의 담수가 유입되어 만 전체에 높은 영양염이 공급된다(이 등 2001). 본 연구에서는 이러한 해역의 지리적특성에 따른 분변성 오염물 *E. coli*와 수질의 환

경오염특성을 살펴보기 위해서, 광양만에서 2010년 2, 5, 8, 11월(총 4회)에 총 20개 정점을 조사하여 구역(Zone) I, II, III의 3개로 나누어 평가했다. 구역 I은 산업시설이 밀집되고 반폐쇄성 해역(정점 1~9), 구역 II는 섬진강 하구의 담수유입의 영향을 강하게 받는 해역(정점 10~15), 구역 III은 비교적 오염도가 낮고 해수교환이 원활한 해역(정점 16~20) 등으로 구분하였다(백 등 2011; Fig. 1 좌측참조).

진해만은 폐쇄적이고 외양과 내만의 혼합 정도가 커서 난류 형성이 보고 되고 있으며, 기상 조건에 따라서 해황의 변동이 심한 곳이다(조 등 1998). 반면 진해만에 귀속되어 있는 마산만은 대도시가 인접하고 있고, 이로 인한 오·폐수의 유입 등 담수의 영향을 현저하게 받는 반폐쇄성 만으로 외해수와의 교환이 원활하지 않아, 수질이 나쁘고 식물플랑크톤 성장에 필요한 영양염류와 각종 미량원소가 풍부하여 식물플랑크톤의 대발생이 빈번하게 일어나는 해역이다. 진해만에서 2010년 2, 5, 8, 11월(총 4회)에 총 23개 정점을 조사하여 구역(Zone) I, II, III, IV으로 나누어 분석하였다. 구역 I은 마산만과 행암만의 반폐쇄성 해역(정점 1~7), 구역 II는 상대적으로 해수의 교환이 원활한 진해만 중앙수역(정점 8, 9, 20, 21, 22, 23), 구역 III은 수하식 굴양식장이 밀집된 진해만 서부해역(정점 10~15), 구역 IV는 주거도시와 조선산업의 영향을 받는 통영(원문만)과 거제도(고현만)를 중심으로 한 진해만 남부해역(정점 16~20) 등으로 구분하였다(현 등 2011; Fig. 1 우측참조).

2. 현장조사

조사는 광양만 20개 정점과 진해만 23개 정점에서 2010년 동계(2/8~12일), 춘계(5/4~7일), 하계(8/24~27일), 추계(11/23~26일)에 각각 수행하였다(Fig. 1).

현장에서 수온과 염분은 CTD(IDRONUT Ocean Seven 319, USA)로 측정하였고, 대장균(*E. coli*)군수와 COD를 산출하기 위해서 각각 1L 무균멸균병과 250mL 채수병(사용전 산처리 세척)에 표층수를 채수하여 실험실로 운반하였다.

Chl. *a*농도는 표층수 500 mL를 선상에서 GF/F필터(ϕ 47 mm Whatman glass fiber filters)로 여과하여, 15 mL 튜브에 넣어 냉동보관 후 90% acetone으로 24시간 냉암소에서 엽록소를 추출한 후 형광측정기(Turner Designs 10-AU Fluorometer)로 측정하여 분석하였다(Parson *et al.* 1984).

COD분석은 해수시료를 알카리성으로 하여 강산화제인 과망간산칼륨을 넣은 다음 일정시간 가열 반응시키

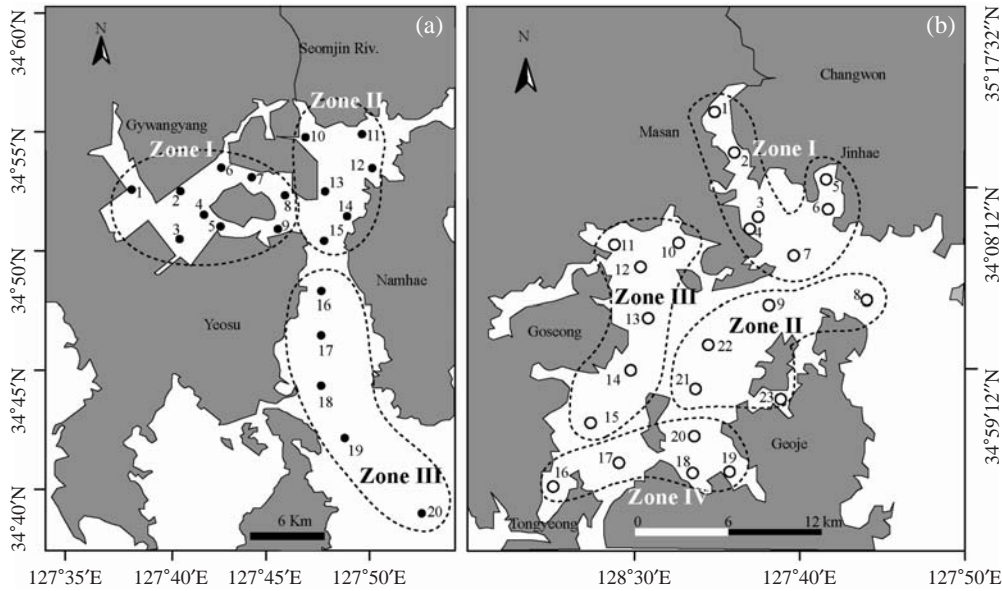


Fig. 1. Map of sampling stations in Gywangyang Bay and Jinhae Bay. The areas were divided into three zones in Gwangyang and four zones in Jinhae based on the pollutant levels.

고 요오드화칼륨 및 황산을 넣어 남아있는 과망간산칼륨에 의하여 유리된 요오드의 양으로부터 산소량을 구하였다(해양수산부 1998).

*E. coli*균수는 다음과 같은 실험순서로 진행하였고, 모든 실험장비는 무균처리(Autoclave, 120°C)한 후 clean bench에서 수행하였다(Fig. 2 참조). 또한 매번 실험시 무균처리된 증류수로 대조구를 만들어 실험환경 중 오염여부를 확인하였다. 실험실로 운반된 1 L 무균채수병의 시료를 교반한 후 40 mL와 80 mL로 정량하여 각각 Membrane filter (0.2 µm pore size)로 여과하였다. 냉장보관된 대장균균용 Petrifilm EC plate (3M, USA)은 사용하기 2~3시간 전 clean bench에 두고 난 후 사용하였다. Petrifilm EC plate의 윗커버를 들어 붉은색 배지 위에 멸균증류수 1 mL을 넣고, 윗커버를 덮고 난 후 Plastic spreader의 평평한 면으로 살짝 눌러 배지를 균일하게 적셔 주었다. 그 후 Petrifilm EC plate의 윗커버를 들고 시료를 여과한 Membrane filter를 붉은색 배지 위에 올린 후 기포가 생기지 않게 조심스럽게 덮었다. 평판배양법으로 접종된 Petrifilm EC plate을 항온배양기(암조건, 35°C)에서 배양 하였다. *E. coli*균체는 48시간 후에 사진 촬영을 병행하여 계수하였고, cfu L⁻¹로 환산하였다.

결 과

광양만의 수온은 하계(24.6±0.7°C), 춘계(17.9±1.3°C),

추계(13.3±0.8°C), 동계(6.3±0.8°C) 순의 차이로 나타났고, 계절별 정점간의 차이는 3~5°C 범위내에서 나타났다. 구역간의 차이는 춘계에 구역 II에서 다른 구역보다 2°C 정도 높았고, 다른 계절에는 큰 차이를 보이지 않았다. 진해만의 수온은 하계(27.6±0.9°C), 춘계(16.1±0.8°C), 추계(14.5±0.4°C), 동계(6.3±0.6°C) 순의 차이로 나타났고, 계절별 정점간의 차이는 광양만보다 크지 않았다. 하계에 광양만의 평균 수온에 비해 3°C정도 높게 나타나 같은 시기 두 해역간의 수온차이를 확인할 수 있었다. 진해만의 구역간 수온은 큰 차이를 보이지 않은 가운데, 하계 구역 II와 구역 III에서 2°C정도의 차이를 보였다(Table 1).

광양만의 염분농도는 다른 구역에 비해 섬진강의 영향을 강하게 받는 구역 II에서 춘계와 하계에 현저히 낮게 측정되었다. 가장 낮게 측정된 하계 구역 II의 평균 염분농도는 21.8±6.7 psu로 나타났다. 진해만 염분농도의 계절적 변화 양상은 광양만과 유사하였다. 하계에는 진해만 전해역에 걸쳐 저염분 수괴가 형성되었고, 그 중 구역 I이 23.9±1.2 psu으로 가장 낮았고, 구역 IV가 27.5±2.0 psu으로 가장 높았다(Table 1).

Chl. *a*농도는 광양만에서 하계(평균: 14.0 µg L⁻¹), 동계(평균: 2.9 µg L⁻¹), 춘계(평균: 2.7 µg L⁻¹), 추계(평균: 1.8 µg L⁻¹) 순으로 나타났고, 하계 구역 I에서 최고치 25.0 µg L⁻¹를 기록하였다. 춘계와 추계에 구역간의 차이는 크지 않았다(Fig. 3상). 진해만에서는 하계(평균: 9.0 µg L⁻¹), 추계(평균: 7.2 µg L⁻¹), 춘계(평균: 4.3 µg L⁻¹), 동계

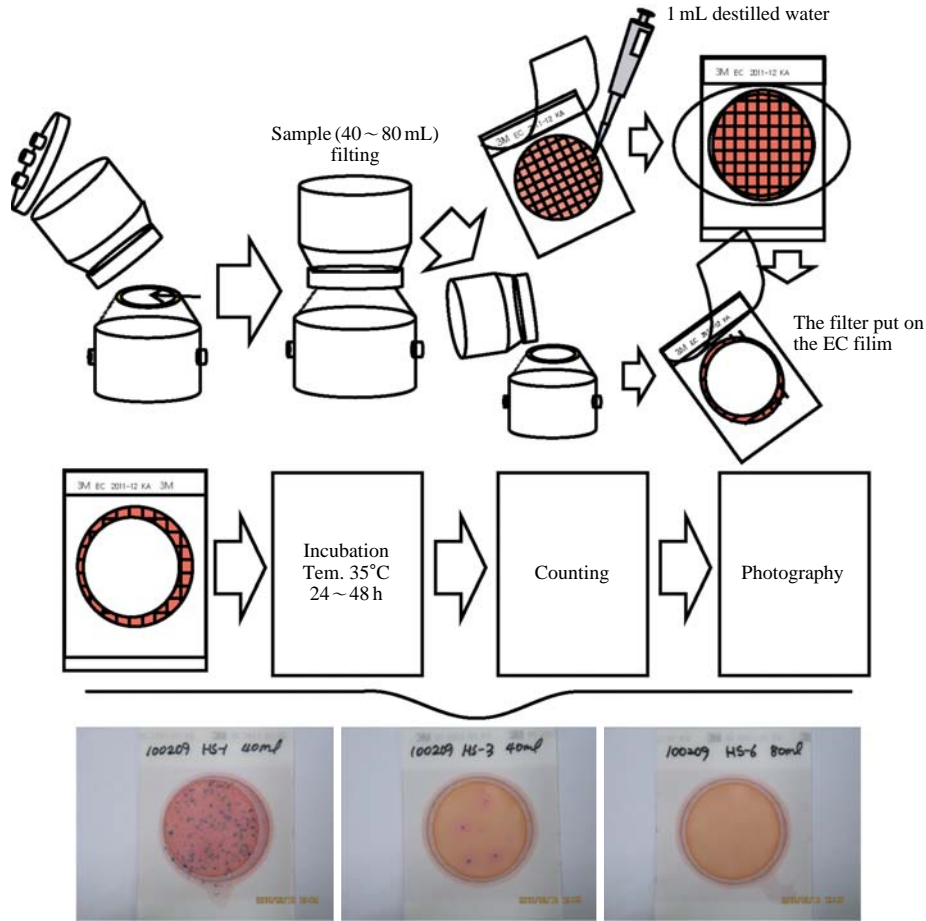


Fig. 2. Diagram of *Escherichia coli* detection methodology.

Table 1. Variation of temperature and salinity in the surface layer at 20 stations in Gwangyang Bay and at 23 stations in Jinhae Bay

	Temperature (°C)				Salinity (PSU)			
	Spring	Summer	Fall	Winter	Spring	Summer	Fall	Winter
Gwangyang Bay								
Zone I	17.00 ± 1.02	24.91 ± 0.74	12.98 ± 0.87	5.79 ± 0.81	26.95 ± 2.18	25.14 ± 2.18	32.77 ± 0.35	32.68 ± 0.20
Zone II	19.02 ± 1.27	24.32 ± 0.60	13.76 ± 0.89	6.93 ± 0.68	22.78 ± 5.10	21.87 ± 6.72	33.27 ± 0.19	32.24 ± 1.16
Zone III	17.75 ± 0.61	24.59 ± 0.60	13.12 ± 0.14	6.37 ± 0.74	28.36 ± 1.01	26.82 ± 2.67	33.62 ± 0.12	33.32 ± 0.34
Jinhae Bay								
Zone I	16.86 ± 0.63	27.71 ± 0.82	14.19 ± 0.41	6.67 ± 0.79	27.98 ± 0.74	23.89 ± 1.24	33.50 ± 0.22	32.37 ± 1.16
Zone II	15.32 ± 0.51	26.91 ± 1.08	14.63 ± 0.48	6.02 ± 0.43	28.49 ± 0.10	25.58 ± 1.07	33.30 ± 0.41	32.77 ± 0.08
Zone III	16.38 ± 0.90	28.45 ± 0.85	14.71 ± 0.27	6.08 ± 0.23	28.38 ± 0.29	25.11 ± 1.52	33.20 ± 0.19	32.41 ± 0.34
Zone IV	15.68 ± 0.51	27.34 ± 0.45	14.38 ± 0.33	6.46 ± 0.61	28.53 ± 0.22	27.47 ± 1.97	32.81 ± 0.18	32.58 ± 0.17

(평균: 3.2 µg L⁻¹) 순으로 나타났다. 진해만은 구역 I에서 모든 계절 다른 구역에 비해 높은 Chl. *a* 농도가 관찰되었고, 굴양식장이 밀집된 구역 III에서 상대적으로 낮게 관찰되었다 (Fig. 3하).

COD 농도는 광양만에서 춘계 (평균: 4.3 mg L⁻¹), 하계 (평균: 2.8 mg L⁻¹), 추계 (평균: 2.3 mg L⁻¹), 동계 (평균: 1.8

mg L⁻¹) 순으로 나타났다. 춘계 구역 I에서 최고치 5.6 mg L⁻¹를, 동계 구역 III에서 최저치 1.5 mg L⁻¹를 기록하였다 (Fig. 4상). 진해만에서는 하계 (평균: 4.6 mg L⁻¹), 춘계 (평균: 3.6 mg L⁻¹), 동계 (평균: 3.2 mg L⁻¹), 추계 (평균: 2.9 mg L⁻¹) 순으로 높게 관찰되었다. 하계 구역 II에서 최고치 5.4 mg L⁻¹를 기록한 것을 제외하면, 조사된 모든 계

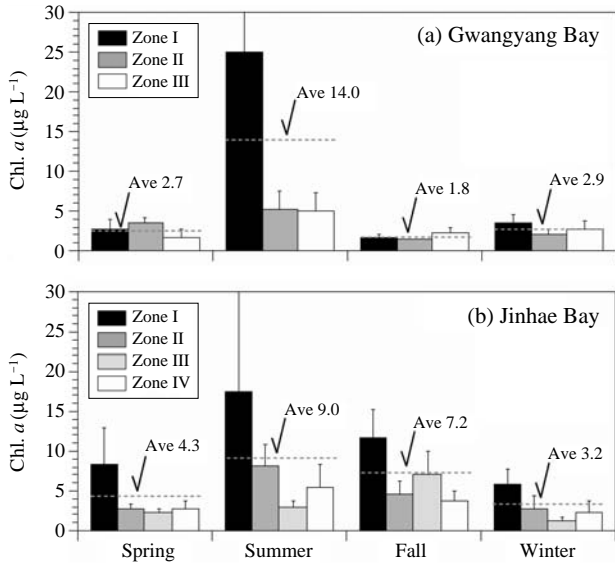


Fig. 3. Seasonal variations of chlorophyll *a* concentration in each zone in 2010. The dot lines indicate mean values. a: Gwangyang Bay, b: Jinhae Bay.

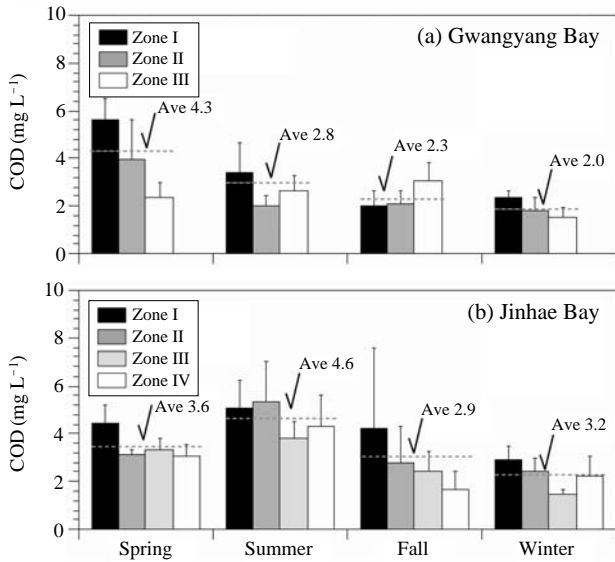


Fig. 4. Seasonal variations of COD concentration in each zone in 2010. The dot lines indicate mean values. a: Gwangyang Bay, b: Jinhae Bay.

절에서 구역 I이 다른 구역에 비해 높은 COD농도를 보였다(Fig. 4하).

*E. coli*는 광양만의 경우 하계에 전 구역에서 다른 기간에 비해 비교적 높게 나타났고, 진해만은 구역 I에서 평균 1,701 cfu L⁻¹로 비교적 높은 군수를 나타내었다. 특히, 광양만은 섬진강의 영향을 강하게 받는 정점 10에서 하계에 최고치 (2,094 cfu L⁻¹)를 기록하였으나, 다른 계

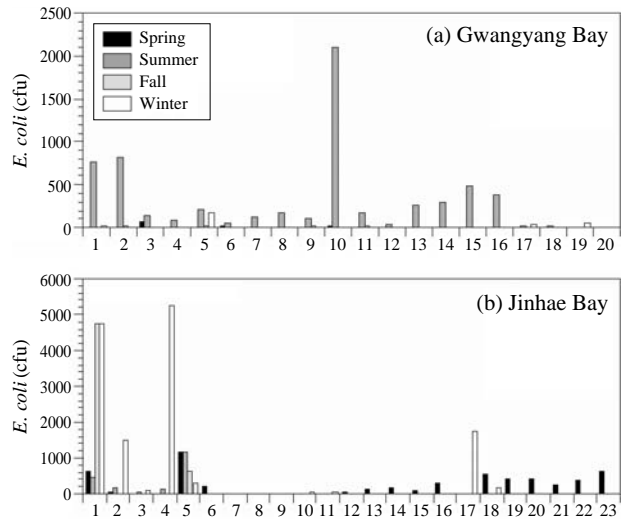


Fig. 5. Seasonal variations of *Escherichia coli* concentration in each station in 2010. a: Gwangyang Bay, b: Jinhae Bay.

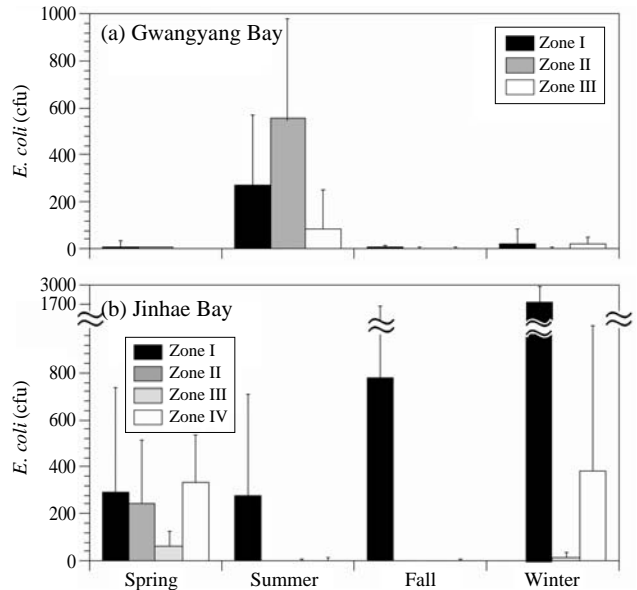


Fig. 6. Seasonal variations of *Escherichia coli* concentration in each zone in 2010. The dot lines indicate mean values. a: Gwangyang Bay, b: Jinhae Bay.

절에는 구역별 뚜렷한 경향을 관찰할 수 없었다(Fig. 5상). 광양만 *E. coli*군수의 구역간의 차이는 하계에 현저했고, 섬진강 영향을 강하게 받는 구역 II에서 상대적으로 높았다. 모든 계절에서 광양만 외측에 속한 구역 III은 상대적으로 적은 *E. coli*군수를 나타내었다(Fig. 6상). 진해만에서는 구역 I에서 다른 구역에 비해 높은 *E. coli*군수를 나타내었다. 구역 I에 속하는 정점중 육상에 가장 가까운 정점 1, 4, 5에서 다른 정점에 비하여 높은 *E. coli*

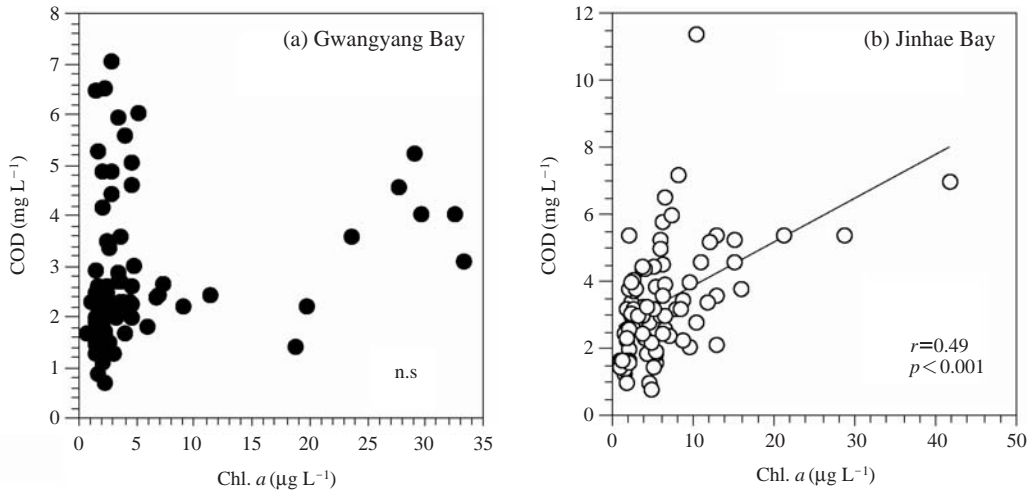


Fig. 7. Relationship between COD and Chlorophyll *a* concentration. A: Gywangyang Bay, B: Jinhae Bay.

군수를 나타내었으며, 특히 동계에 정점 4에서 최고치 (5,250 cfu L⁻¹)를 보였다 (Fig. 5하). 춘계와 동계에 구역 IV에서 각각 평균 336 cfu L⁻¹, 383 cfu L⁻¹으로 비교적 높은 *E. coli*군수가 관찰되었다. 춘계에는 구역 IV에 속한 모든 정점에서 비교적 높게 관찰되었으나, 동계에는 정점 17에서 1,758 cfu L⁻¹로 상당히 높은 *E. coli*군수를 보여 구역 IV의 평균값을 높게 하였다(Fig. 6하).

고찰

본 연구는 광양만과 진해만에서 수온, 염분, 분변성 대장균 *E. coli*, Chl. *a*, COD (화학적산소요구량)의 농도를 조사하여 당 해역의 해양환경오염특성을 파악하였다. 두 해역에서 오염물 유입 특성과 해수교환, 생물, 지리, 물리, 화학적인 특성 등을 고려하여 광양만은 3개 구역, 진해만은 4개 구역으로 나누었다(백 등 2011; 현 등 2011). 광양만에서 구역 I의 주변은 산업단지가 조성되어 있고, 서북쪽에는 동강이 위치하며, 반폐쇄성 지역이라 해수의 교환은 원활하지 않다. 구역 II는 섬진강의 영향을 강하게 받는 지역이고, 구역 III은 외해와의 교환이 잘 이루어지며, 다른 두 구역에 비하여 오염원이 상대적으로 적었다. 진해만의 구역 I은 해수 유동이 극히 제한되어 과(부)영양화된 수역으로 적조가 사계절 관찰되었다. 구역 II는 외해와의 해수교환이 원활하고, 육상으로부터 유기오염의 부하가 적었다. 구역 III은 대규모의 이매패류 양식이 활발한 해역으로 *E. coli* 등 식품가공에 문제를 일으키는 미생물 등에 대한 지속적인 모니터링이 요구되는 지역으로서 유기오염의 부하는 높지 않았다.

구역 IV는 조선산업이 발달된 고현만, 원문만에 위치하는 정점으로 오염물 부하가 상대적으로 높았다. 광양만의 Chl. *a*농도 또한 구역 I>구역 II>구역 III의 순으로 높았으며, 진해만은 구역 I>> 구역 II>구역 IV>구역 III의 순서로 나타났다. 결과적으로 분변성 대장균 *E. coli*, Chl. *a*, COD (화학적산소요구량)의 농도를 바탕으로 검토한 결과, 광양만의 유기오염물질의 부하는 구역 I>구역 II>구역 III>순으로, 진해만은 구역 I>구역 IV>구역 III>구역 II으로 높게 나누어졌다.

수온은 미소생물의 성장에 영향을 미치며, Chl. *a*농도와 대장균 *E. coli*의 분포 또한 수온의 영향을 강하게 받는다(Terzieva and McFeters 1991; Villate *et al.* 2008). 광양만과 진해만의 두 해역에서도 Chl. *a*는 하계조사에서 가장 높은 농도를 보였다. 광양만은 섬진강으로부터 유입된 담수로 만 전체에 저염분화와 더불어 높은 영양염 공급원이 되고, 비교적 얇은 수심의 폐쇄성 내만인 광양만에서 하계의 높은 수온과 광량으로 식물플랑크톤의 대발생을 일으켜 해역의 Chl. *a*농도가 전해역에 걸쳐 높게 나타났고, 추계와 동계는 강우량도 현저히 줄어 해역의 Chl. *a*농도가 감소되었다. 이러한 광양만의 지리학적 환경 특성은 Chl. *a*농도의 계절편차를 크게한 원인으로 생각된다. *E. coli*는 하계 광양만에서만 높은 밀도를 유지하였다. Benford(1933)는 북태평양에 서식하는 미소생물의 최적 성장수온은 20~25°C로 보고하였다. 또한 김 등(2007)의 보고에 의하면 우리나라 동해 및 동남부 연안해역에서 >20°C의 수온조건에서 78.8%의 대장균군이 양성반응을 보였고, 그 중 56.8%가 분변계 대장균으로 판단되었다. 본 조사에서 하계 모든 정점에서 수온이 >23°C으로 나타나, 두 해역 모두 대장균의 현저한 증

식에 영향을 미쳤을 것으로 판단되며, 이와 같이 수온은 해역의 대장균 분포에 영향을 미치는 중요한 계절적 인자로 생각된다. 반면, 동계 5,250 cfu L⁻¹으로 최고치를 기록한 진해만의 정점 4는 창원시(마산시)에서 배출되는 하수종말처리장의 배출수 영향을 강하게 받았을 것으로 판단된다. 하수처리의 정도에 따라서 주변 해역의 오염정도가 다를 수 있기 때문에 추후 지속적으로 관심을 가지고 모니터링이 필요하다고 생각된다.

분변성 대장균은 사람 및 동물의 배설물에 대한 영향을 조사하는 데 좋은 지표로 활용가능하다. 연안해역의 분변성 대장균 중 *E. coli*는 강우(Lipp *et al.* 1999; Solo-Gabriele *et al.* 2000)에 따른 해역의 염분농도구배(Kator and Rhodes 1994; Tassoula 1997)에 영향을 받는다. 특히 *E. coli*는 담수 및 연안해역의 유기오염지표로 널리 이용된다. 광양만의 *E. coli*군수는 하계 구역 II에서 높게 나타난 반면, 정점 15을 기점으로 바깥쪽 정점(외해)으로 향하는 구역 III에서 *E. coli*의 군수가 급격히 감소하는 양상을 보였다. 특히 하계 섬진강 영향을 직접적으로 받는 구역 II의 평균염분은 21.87 psu로 극히 낮았고, *E. coli*군수는 높게 관찰되었다. 이는 하계 섬진강으로부터 유출된 담수의 영향을 다른 조사기간에 비하여 현저했다고 판단된다. Ogawa (1974)는 하구에서 외양으로 갈수록 대장균수가 감소하는 경향은 하구에 유입된 유기물이 해수와 희석정화되어 대장균이 이용할 영양분 고갈로 기인된 것과 더불어 그들의 군체 또한 희석과정에서 확산되었다고 보고하였다. 또한 대장균과 같은 극미소생물은 담수기원의 현탁입자에 부착되어 저층으로 빠르게 침강하여 수주내 개체수 감소의 원인이 된다고 보고하였고(Ogawa 1974; Solo-Gabriele *et al.* 2000), 이는 본 조사해역의 광양만에서도 일치하는 양상을 보였다. Solo-Gabriele *et al.* (2000)는 집중강우 2일 후 하구역에서 *E. coli*의 높은 밀도를 관찰하였고, 본 연구의 광양만에서도 하계 조사 2일 전 집중강우에 의한 분변성 오염물질의 영향으로 *E. coli*의 군수가 증가하였다고 판단된다.

현행 COD는 우리나라 해역의 유기오염지표로 활용되고 있으며, 각 해역의 수질오염등급을 판정하고 있다. COD를 근거로 한 광양만의 수질등급은 1997년 이전에는 2등급을 유지하였으나, 1998년부터 수질이 3등급 이하로 악화되었고, 2004년 이후 점차적으로 개선되는 경향이 보고되었다(국토해양부 한국해양환경조사연보). 진해만은 1999년도 이전에 3등급 이하의 수질을 보였으나 그 후 2, 3등급의 수질로 조금 개선된 것으로 보고되었다(국토해양부 한국해양환경조사연보). 본 조사에서 COD분포는 광양만에서 전체평균 2.84 mg L⁻¹±1.42으로 3등급의 수질을 나타내었으며, 오염정도는 구역 I>

구역 II>구역 III 순으로 나타났다. 진해만은 전체평균 3.55 mg L⁻¹±1.62으로 3등급 이하의 수질을 나타내었으며, 오염정도는 구역 I>구역 II>구역 III>구역 IV 순으로 높게 나타났다. 광양만은 앞서 언급한 구역별 오염정도와 유사한 결과를 보였다. 구역 I은 매립지에 세워진 산업단지과 더불어 동강 등으로부터 유입되는 오염물질이 구역 II(섬진강 주변해역)나 구역 III(외측으로 향하는 정점)보다 높다는 것을 시사 할 수 있다. 진해만은 구역 II를 제외한 나머지 구역에서 앞서 언급한 해역의 오염정도와 유사한 양상을 보였다. 특히 외양으로 향하는 구역 II(상대적으로 청정해역의 정점)에서 COD농도가 높게 나타난 것은 오염도가 적은 외양수에 낙동강하구에서 방출되는 담수와 혼합되면서 진해만에 바깥쪽 정점에 영향을 미친 것으로 사료된다. 또한 구역 II에서의 COD농도와 Chl. *a*와의 계절별 상관분석을 살펴본 결과, 동계에 유의한 상관관계를 보였다. 즉, 담수의 영향을 적게 받는 동계 구역 II에서는 유기오염의 영향을 적게 받는다고 해석할 수 있다. 하지만 낙동강하구의 담수의 영향이 구역 II에 영향을 미치는 것을 평가하기 위해서는 해수의 순환정도를 파악할 수 있는 물리적인 데이터가 추가적으로 요구된다.

광양만에서 COD농도와 Chl. *a*농도와의 유의한 상관성이 나타나지 않았고(Fig. 7좌), 계절별로 나누어 다중상관분석한 결과 하계($r=0.69$)와 동계(0.71)에 높은 상관성이 있었고, 춘계($r=0.30$), 추계($r=0.34$)에는 상대적으로 낮게 나타났다. 반면 진해만 전체해역에서 COD와 Chl. *a*농도는 유의한 상관성을 보였다($r=0.49$, $p<0.001$). 계절별로 나누어 볼 때 춘계($r=0.84$)>추계(0.86)>동계(0.64)>하계(0.51) 순으로 높게 나타났다. Tatsu-yuki *et al.* (2005)에 의하면 Chl. *a*농도는 COD, SS(부유물질, Suspended Solid)와의 높은 상관성을 언급하였고, 본 연구에서도 그들의 연구와 비교적 잘 일치하였다. COD와 *E. coli*의 상관관계는 하계 광양만의 구역 II에서 나타난 결과 이외에는 계절과 구역별로 뚜렷한 상관성을 보이지 않았다.

해양에서 유기오염물질은 부유성플랑크톤의 분해과정과 육상기원의 오폐수에 의하여 발생한다. Chl. *a*농도와 *E. coli*의 분포 또한 해역의 오염정도(건강성)를 평가할 수 있다(백 등 2010). 또한 *E. coli*와 같은 분변계 대장균의 계절적 분포에 관한 연구는 안전한 해양수산물의 위생관리에 매우 중요하다. 현행법상 해수욕장의 수질 기준은 총 대장균 군수가 같은 해역 여러정점에서 측정된 평균값으로 1,000 cfu 100 mL⁻¹를 넘으면 적절하지 않으며, 미국의 EPA(USEPA, United States Environmental Protection Agency)기준으로는 총 대장균 군수 뿐만

아니라 Enterococci (평균 35 cfu 100 mL⁻¹, 일일 104 cfu 100 mL⁻¹), fecal coliform (평균 200 cfu 100 mL⁻¹, 일일 800 cfu 100 mL⁻¹) 등 다양한 기준을 선정하여 해양에서 안전한 레저활동을 할 수 있는 가이드라인을 마련하고 있다. Enterococci의 군수는 오염된 수역에서 해수욕을 한 후 발생하는 위장질환을 예측할 수 있는 인자로 이용 가능하다고 보고된 바 있다 (Wade *et al.* 2006). 하지만 본 연구에서 조사하지 않은 Enterococci군수의 분포 특성은 *E. coli*와 상당히 유사한 발생분포 특성을 보였다 (Coupe *et al.* 2006), 해수욕장이나 레크리에이션을 할 수 있는 해역에서 *E. coli*를 분포특성을 확인하면, 위장질환을 간접적으로 추정할 수 있다고 판단된다. 본 조사해역에서는 해수욕장이나 레크리에이션을 할 수 있는 기반환경이 조성되어 있지 않지만, 이매폐류 등과 같은 양식장이 집중분포하고 있기 때문에, 안전한 수산물의 위생관리를 위해서 *E. coli*의 출현여부는 매우 중요하다. 특히 유기오염원에 반응하는 대장균의 계절적, 수평적 분포특성을 파악한 것은 당 해역의 건강성을 평가할 수 있는 중요한 기초자료로 활용될 것이다.

적 요

본 연구는 해역의 수질오염 특성을 알아보기 위해서 2010년 2, 5, 8, 11월에 광양만 20개 정점과 진해만 23개 정점에서 COD (화학적산소요구량, Chemical Oxygen Demand), Chlorophyll *a*, 대장균 *Escherichia coli*를 조사하였다. 또한, 광양만과 진해만의 지형학적특성을 고려하여 각각 3개 구역, 4개 구역으로 나누어 평가하였다. 광양만의 COD농도는 춘계 (평균: 4.3 mg L⁻¹)에 가장 높았고, 구역 I (반폐쇄성 해역; 정점 1~9)에서 평균 5.64 mg L⁻¹으로 가장 높았다. Chl. *a*농도는 하계 (평균: 14.0 µg L⁻¹)에 현저히 높았고, 구역 I에서 최고치 25.0 µg L⁻¹를 보였다. *E. coli*군수는 하계에 높게 나타났고, 섬진강에 가장 가까운 정점 10에서 최고치 2,094 cfu L⁻¹를 기록하였다. 반면, 외측정점 (정점 15~20)으로 향할수록 그들의 개체수는 현저하게 줄어드는 양상을 보였다. Chl. *a*는 섬진강의 영향을 받는 광양만의 산업단지와 대도시가 인접하고, 수계의 혼합이 적은 지역에서 가장 높았다. 진해만에서는 구역 I (마산만과 행암만의 부영양화된 수역)에서 다른 구역에 비해 집중되어 *E. coli*군수를 보였다. 구역 I에 속하는 정점 중 육상에 가장 가까운 정점 1, 4, 5에서 다른 정점에 비해 많은 *E. coli*군수를 나타내었으며, 특히 동계에 정점 4에서 최고치 (5,250 cfu L⁻¹)를 보였다. 그 외 춘계와 동계에 구역 IV에서 각각 평균 336 cfu L⁻¹,

383 cfu L⁻¹로 비교적 많은 *E. coli*군수가 관찰되었다. 광양만의 COD와 Chl. *a*와의 상관성이 관찰되지 않았으나, 진해만에서는 유의한 상관관계를 보였다 ($r=0.49$, $p<0.001$). 결론적으로, 본 연구에서 얻은 결과는 해역의 지형학적특성에 따른 수질오염을 가늠할 수 있는 기초적인 자료로 활용가능하다고 판단된다.

사 사

본 연구는 한국해양연구원 연구과제 “남해특별관리해역의 관리를 위한 해양생태계 건강성 지수 개발 (PE98582)”과 “전략무인도서 해양생태계 기반 관리기술 개발연구 (PE98583)”의 지원으로 수행되었습니다. 현장 조사에 도움을 주신 현봉길, 이은선 연구원님께 진심으로 감사의 마음을 전합니다.

참 고 문 헌

- 강 현, 여환구. 2001. 연안해역에서 분변오염의 생화학적 지표 (coprostanol)에 관한 연구. 한국해양환경공학회지. 4: 40-52.
- 김광식. 1968. 10대강 유역의 물수지. 한국기상학회지. 4:1-7.
- 김영만, 김경희, 박혜정. 2007. 해수의 대장균군과 분변계대장균의 검출률 비교 분석. 한수지. 40:288-292.
- 김순환, 신영민, 여명자, 신필기, 김미경, 조정숙, 이창희, 이영자, 채갑용. 2005. 해산물식품 중 식중독원인균의 오염패턴 및 저감화 방안. 한국생명과학회지. 15:941-947.
- 박석환, 이건형. 2006. 삼천포만 인근해역과 저질토에서 종속영양세균과 분변성 기원 세균의 분포. 환경생물. 24: 258-267.
- 백승호, 최현우, 김영옥. 2010. 진해만에서 부유생물을 이용한 해양생태계 건강성평가 예비조사. 환경생물. 28:125-132.
- 백승호, 김동선, 현봉길, 최현우, 김영옥. 2011. 동계광양만에서 식물플랑크톤 군집구조의 수평적 분포특성과 성장에 미치는 영양염 제한 특성. Ocean and Polar Res. in press.
- 이원재, 박영태, 김무찬, 성희경. 1991a. 수영만의 수질환경과 대장균. 1. 하계의 수질환경과 대장균에 관하여. J. Fish. Pathol. 4:15-21.
- 이원재, 박영태, 강원배, 임월애, 이정화. 1991b. 수영만의 수질환경과 대장균. 2. 동계의 수질환경과 대장균에 관하여. J. Fish. Pathol. 4:23-30.
- 이영식, 이재성, 정래홍, 김성수, 고우진, 김귀영, 박종수. 2001. 광양만에서 식물플랑크톤의 제한영양염. 한국해양학회지 [바다]. 6:201-210.

- 정규진, 신석우. 1996. 여수연안 및 동중국해의 세균상 1. 일 반세균, *Vibrio* spp., 대장균군 군수에 따른 수평분포. 한국수산학회지. 29:9-16.
- 조경제, 최만영, 광승국, 임성호, 김대윤, 박종규, 김영의. 1998. 마산-진해만 수질 부영양화 및 계절 변동. 한국해양학회지 [바다]. 3:193-202.
- 해양수산부. 1988. 해양환경공정시험법. 해양수산부고시 제 1998-4호. 316pp.
- 현봉길, 신경순, 김동선, 김영옥, 주혜미, 백승호. 2011. 생물검정실험을 통한 진해만 식물플랑크톤의 군집 변동 특성 파악. 한국해양학회지 [바다]. 16:27-38.
- Benford RH. 1993. Marine bacteria of the northern Pacific Ocean. The temperature range of growth. Contrib. Can. Bilo. Fisheries 8:433-438.
- Choi JD and WG Jeong. 1998. A bacteriological study on the sea waters and oyster in Puk Man, Korea. Kor. J. Malacol. 14:19-26.
- Coupe S, K Delabre, R Pouillot, S Houdart, M Santillana-Hayat and F Derouin. 2006. Detection of *Cryptosporidium*, *Giardia*, and *Enterocytozoon bienersi* in surface water, including recreational area; a one-year prospective study. FEMS Immunol Med Microbiol. 47:351-359.
- Kator H and M Rhodes. 1994. Microbial and chemical indicators. pp.30-91. In Environmental indicators of shellfish safety (Hackney CR and MD Pierson eds.). 1994. Chapman and Hall. New York.
- Lipp EK, JB Rose, R Vincent, RC Kurz and C Rodriguez-Palacios. 1999. Assesment of the microbiological water quality of Charlotte Harbor, Florida. Technical Report. Southwest Florida Water Management District, Brooksville.
- Munn CB. 2004. Marine Microbiology (Ecology & Application). BIOS Scientific Publishers, London and NewYork.
- Ogawa G. 1974. Some factors affecting the survival of coliform bacteria in seawater. J. Oceanogr. Soc. Japan 30:54-60.
- Parsons TR, Y Maita and CM Lalli. 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon press. Oxford.
- Solo-Gabriele HM, MA Wolfert, TR Desmarais and CJ Palmer. 2000. Sources of *Escherichia coli* in a Coastal Subtropical Environment. Applied and Environmental Microbiology 66:230-237.
- Tatsuyuki I, K Ryoichi and F Masayuki. 2005. Influence of Chl. *a* Concentration on the Purification of Nitrogen and Phosphorus in a Lagoon. Journal of Japan Society of Hydrology & Water Resources 18:674-680.
- Terzieva SI and GA McFeters. 1991. Survival and injury of *Escherichia coli*, *Campylobacter jejuni*, and *Yersinia enterocolitica* in stream water. Can. J. Microbiol. 37:785-790.
- U.S. Environmental Protection Agency. 2000. EPA's BEACH Watch Program, 2000 Update. EPA-823-F00-012. Washington, DC, USA.
- Villate R, G Aravena, A Iriarte and I Uriarte. 2008. Axial variability in the relationship of chlorophyll a with climatic factors and the North Atlantic Oscillation in a Basque coast estuary, Bay of Biscay (1997-2006). J. Plankton Res. 30:1041-1049.
- Yoo SK, JS Park, P Chin, DS Chang, CK Park and SS Lee. 1980. Comprehensive studies on oyster culture in Hansan, Geoje, Bay. Bull. Fish. Res. Develop. Agency 24:7-46.
- Wade TJ, RL Calderon, E Sams, M Beach, KP Brenner and AH Williams. 2006. Rapidly measured indicators of recreational water quality are predictive of swimming-associated gastrointestinal illness. Environ Health Perspect 114:24-28.

Manuscript Received: June 26, 2011
 Revision Accepted: August 3, 2011
 Responsible Editor: Hak Young Lee