

강화도 남부 해역 인근 육상오염원의 환경변화에 따른 세균상 변동 및 항생제 내성균 내성 특성

정연겸 · 박보미¹ · 김지윤 · 김영주 · 황진익 · 오은경*

국립수산과학원 서해수산연구소, ¹BioMérieux Korea Co., Ltd.

Variations in Bacterial Groups and Antimicrobial Resistance Characteristics with Changing Environmental Inland Pollution Sources in the Southern Coastal Area of Ganghwa Island, South Korea

Yeon Gyeom Jeong, Bomi Park¹, Ji Yoon Kim, Young Ju Kim, Jin Ik Hwang and Eun Gyoung Oh*

West Sea Fisheries Research Institute, National Institute of Fisheries Science, Incheon 22383, Republic of Korea
¹BioMérieux Korea Co., Ltd., Seoul 06243, Republic of Korea

This study investigated the seasonal dynamics of bacterial communities and antimicrobial resistance in the southern coastal waters of Ganghwa Island, South Korea. Twelve samples were collected seasonally from three inland pollution sources (sites 1–3) in 2021. High concentrations of total and fecal coliforms were detected at all sites, with site 1 showing the highest levels (5,400,000 and 2,300,000 MPN/100 mL, respectively). In total, 264 gram-negative bacteria were isolated, including as the dominant genera *Escherichia* spp., *Klebsiella* spp., and *Pseudomonas* spp.. Antimicrobial resistance analysis revealed site- and season-specific variations. The lowest resistance rates were observed in November (site 1), April (site 2), and August (site 3). Seasonal variations were evident in the resistance profiles and multiple antimicrobial resistance (MAR) indices, with the lowest MAR rates recorded in November. More than 50% of the isolates collected in February, April, and August showed resistance to five key antimicrobials, including ampicillin and ceftiofur. These results suggest that inland pollution sources contribute to the dissemination of antimicrobial-resistant bacteria in adjacent coastal environments and that seasonal environmental changes may influence resistance patterns. These findings provide valuable baseline data inform the management of inland pollution, enhance seafood hygiene practices, and safeguard the health of marine ecosystems.

Keywords: Antimicrobial resistance, Bacterial groups, Gram-negative bacteria, Inland pollution source, Multi antimicrobial resistance

서론

항생제는 사람 뿐만 아니라 가축과 수산물의 질병 예방 및 치료를 위해 중요한 역할을 하며, 축산업과 수산업의 발전에 크게 기여해 왔다. 국내 항생제 판매량은 2018년 약 984톤, 2019년 약 927톤, 2020년 약 919톤, 2021년 약 1,061톤, 2022년 약 960톤으로 매년 비슷한 수준을 유지하고 있다(MFDS, 2022). 항생제는 세균성 질병을 치료하는 데 필수적인 의약품이지만, 지속적인 사용과 오남용은 항생제 내성균과 다제내성균의 출현을

유발하는 주요 원인으로 작용하며(WHO, 2014; Kwon et al., 2019), 이는 새로운 감염병 발생보다 더 큰 영향을 미쳐 사회 경제적 손실을 가져오고 공중보건에 심각한 위협을 초래한다(WHO, 2014; NPCC, 2016; Lee et al., 2019). 항생제 내성균의 확산은 다양한 경로를 통해 이루어지는데, 최근 환경에서도 임상에서 사용하는 항생제에 내성을 지닌 세균이 발견되고 있으며, 특히 수환경에서 검출되는 다제내성균이 큰 문제가 되고 있다(Chitanand et al., 2010). 육상오염원은 항생제 내성균 확산의 주요 원인으로 지목되고 있으며, 이는 공중보건에 심각한 위

*Corresponding author: Tel: +82. 32. 745. 0750 Fax: +82. 32. 745. 0619

E-mail address: ohdagu@korea.kr



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<https://doi.org/10.5657/KFAS.2025.0516>

Korean J Fish Aquat Sci 58(5), 516-527, October 2025

Received 19 July 2025; Revised 4 September 2025; Accepted 21 September 2025

저자 직위: 정연겸(연구사), 박보미(매니저), 김지윤(연구사), 김영주(연구사), 황진익(연구사), 오은경(연구관)

협이 되고 있다. 병원 및 축산시설에서 배출된 잔류 항생제와 내성균을 포함한 오염물질들은 생활하수, 축산폐수, 우수 및 하천 등을 통해 환경으로 유입되며, 이러한 오염원이 강우나 태풍 등의 자연 현상에 의해 수환경으로 운반될 때 내성균의 확산이 더욱 촉진될 수 있다(Ikehata et al., 2006; Knapp et al., 2010). 특히, 이러한 오염물질에는 장내세균 뿐만 아니라 다양한 환경 유래 병원성 세균도 포함되어 있어, 해양 생태계와 인근 수산생물의 안전성에 심각한 영향을 미칠 수 있다(Roh et al., 2018). 이러한 문제를 해결하기 위해서는 육상오염원의 관리 강화와 더불어 내성균 확산을 차단하기 위한 체계적인 접근이 필요하다(Kwon et al., 2019).

해양 환경에서 항생제 내성균의 발생과 확산 양상을 보다 명확히 파악하기 위해서는, 다양한 육상오염원이 인접하고 수산물 생산이 이루어지는 해역을 중심으로 한 조사가 필요하다. 이에 본 연구에서는 환경적 특성과 활용도가 복합적으로 작용하는 강화도 남부 해역을 조사대상으로 선정하였다. 강화도 남부 해역은 인천광역시 강화군 화도면에 접한 해역이다. 연안 및 근해 지역은 주로 대륙붕으로 이루어져 있으며, 이는 외양 해수와 의 혼합과 교환이 느리기 때문에 오염물질의 체류 시간이 길어, 외부로부터 오염부하가 지속될 경우 해양 생태계의 균형이 깨질 우려가 있다. 강화도 남부 해역은 가무락, 굴, 바지락 등 다양한 패류가 생산되고 있으나, 인근에 펜션 등 인가가 다수 있고, 주변에 농경지, 새우양식장 등이 위치하고 있어 생활하수, 농업용수, 양식용수가 해역으로 배출될 우려가 있다. 이에 따라 본 연구에서는 강화도 남부 해역 인근 배수구역에 위치한 주요 육상오염원을 대상으로 계절적 변화에 의한 인근 환경변화에 따른 분변오염도 변화를 확인하고 분리된 세균에 대한 항생제 내성 및 다제 내성 양상을 파악하여 항생제 내성 연구의 기초자료로 활용하고자 하였다.

재료 및 방법

시험 시료

강화도 남부 해역으로 유입되는 외부 오염원 중, 육상오염원의 영향 평가를 위하여 해역의 위생상태에 직접적인 영향을 줄 수 있는 조사지점 3개소를 선정하여 2021년 2월부터 11월까지 채취하였다(Fig. 1). 계절에 따른 인근 환경 변화로 인한 영향을 파악하기 위하여 2월, 4월, 8월, 11월 등 네 차례에 걸쳐 총 12개 시료를 채취하였으며, 모든 채취일의 기상 상황은 특별한 이상 없이 전반적으로 양호하였다. 채취 당시 시료의 수

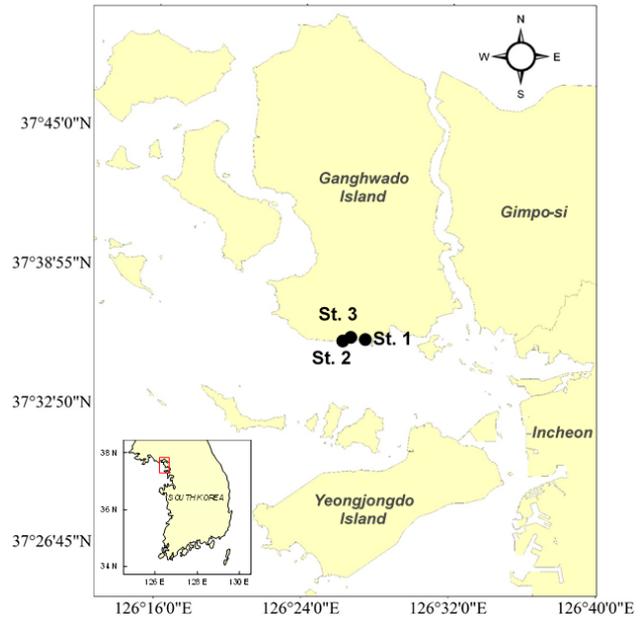


Fig. 1. Sampling station of inland pollution sources (●) in the Southern Coastal Area of Ganghwa Island, South Korea.

온은 2월 9.5–11.4°C, 4월 11.5–13.1°C, 8월 25.2–29.5°C, 11월 16.6–18.3°C 범위였다. 시료는 멸균된 채수병에 1 L 이상 채취하여 10°C 이하로 유지하면서 실험실로 운반하여 24시간 이내에 실험을 실시하였다. 채취한 시료에 대한 정보는 Table 1에 나타내었다.

대장균군 및 분변계대장균 시험

육상오염원의 위생성상을 파악하기 위한 대장균군 및 분변계대장균 시험은 laboratory procedures for the examination of sea water and shellfish (APHA, 1984) 방법에 따라 실험하였다. 추정시험에는 lauryl sulfate broth (Oxoid, Basingstoke, UK)를 사용하여 35±0.5°C에서 24–48±2시간 배양하였고 산과 가스를 생성하는 관을 양성으로 하여 확정시험에 사용하였다. 확정시험에는 Brilliant green bile lactose broth 2% (Oxoid)와 EC broth (Oxoid)를 사용하였으며 각각 35±0.5°C에서 24–48±2시간, 44.5±0.2°C에서 24±2시간동안 배양하였다. 실험결과는 각 희석단계별로 5개의 시험관을 사용한 최확수법 (most probable number, MPN)으로 산출하여 MPN/100 mL으로 표기하였다.

Table 1. Information about the inland pollution sources sample

Station	Type of discharge	Size and shape (cm)	GPS
1	Domestic waste water	150×150	37°35'36"N 126°27'22"E
2	Domestic waste water	∅100	37°35'41"N 126°26'33"E
3	Domestic waste water	∅150	37°35'44"N 126°26'35"E

그람음성세균 시험 및 분리 동정

육상오염원의 분변오염 및 주변 환경에 대한 정보 수집을 위하여 EMB (eosin methylene blue) agar (Merck, Darmstadt, Germany)로 장내세균 및 환경세균 등 그람음성세균을 분리하고자 하였다.

양성으로 확인된 lauryl sulfate broth (Oxoid) 배양액을 EMB agar에 도말하여 단일 colony를 순수 분리하였다. Tryptone soya agar (Oxoid)에 분리된 균주를 streaking하여 37°C에서 18–24시간 순수배양한 후 3 mL 0.45% NaCl 용액에 0.5 McFarland가 되도록 현탁한 후 VITEK 2 system (bioMerieux, Marcy-l'Étoile, France)을 이용한 생화학적 기법으로 최종 동정하였다.

최소억제농도법을 이용한 항생제 내성 시험

최소억제농도법(minimum inhibitory concentrations, MICs)을 이용한 항생제 내성 시험은 식품의약품안전처에서 제공하는 국가 항생제 사용 및 내성 모니터링(MFDS, 2020)에 준하여 실시하였다(Table 2).

VITEK2 System으로 동정 및 최종 확인한 분리 균주를 mueller-hinton agar (Oxoid) 평판에 streaking하여 37±1°C에서 18–20시간 배양한 후 평판배지의 집락을 멸균된 loop로 취한 후 5 mL 멸균된 증류수에 현탁하여 0.5 McFarland로 탁도를 조정하였다. 탁도를 조정한 현탁액을 cation adjusted mueller-hinton broth (Sensititre, Lenexa, KS, USA) 11 mL tube에 10 µL 분주하여 균질화 또는 충분한 vortexing 한 후, 검사 항생제

가 well 마다 농도별로 coating된 KRVN5F panel (Sensititre, East Grinstead, UK)에 각각 50 µL씩 분주하고 35±0.5°C에서 18–24시간 배양하였다. 이 때 사용하는 MIC panel은 MFDS (2020)에 따라 동일하게 주문 제작하여 사용하였다.

Panel에는 16종의 항생제가 농도별로 포함되어 있으며 항생제 종류는 다음과 같다: amoxicillin/clavulanic acid (AmC), ampicillin (AMP), cefepime (FEP), cefoxitin (FOX), ceftazidime (CAZ), ceftiofur (XNL), chloramphenicol (CHL), ciprofloxacin (CIP), colistin (CL), gentamicin (GEN), meropenem (MEM), nalidixic acid (NAL), streptomycin (STR), sulfisoxazole (FIS), tetracycline (TET), trimethoprim/sulfamethoxazole (SXT).

배양이 완료된 MIC panel을 MIC 검사용 자동형광 판별기 (OptiRead; Thermo Fisher Scientific, Basingstoke, UK)로 판독하여 세균 증식이 관찰되지 않은 가장 낮은 농도를 MICs로 판정하였다. 판정된 MIC 농도를 항생제 내성기준(breakpoints)과 비교하여 내성(R), 중간내성(I), 감수성(S)으로 판정하였다. 결과의 판정은 CLSI (2020)을 근거로 하였다. 분리균주의 항생제 다제 내성(multiple antimicrobial resistance, MAR) 정도는 MAR index로 나타내었으며, MAR index는 항생제 내성 시험에 사용된 총 항생제 종류의 수(16종)에 대한 내성을 나타내는 항생제 종류의 수의 비율(내성을 나타내는 항생제 종류의 수 / 시험에 사용된 총 항생제 종류의 수)로 계산하였다(Krumperman, 1983; Titilawo et al., 2015).

Table 2. Types of antimicrobials and breakpoints used for minimum inhibitory concentrations (MIC) test

Antimicrobial agents (Abbreviation)	Range tested (µg/mL)	MIC breakpoints (µg/mL)			Reference
		R	I	S	
Amoxicillin/clavulanic acid (AmC)	2/1–32/16	≥32/16	16/8	≤8/4	CLSI (2020)
Ampicillin (AMP)	2–64	≥32	16	≤8	CLSI (2020)
Cefepime (FEP)	0.25–16	≥16	4–8	≤2	CLSI (2020)
Cefoxitin (FOX)	1–32	≥32	16	≤8	CLSI (2020)
Ceftazidime (CAZ)	1–16	≥16	8	≤4	CLSI (2020)
Ceftiofur (XNL)	0.5–8	≥8	4	≤2	NARMS (2021)
Chloramphenicol (CHL)	2–64	≥32	16	≤8	CLSI (2020)
Ciprofloxacin (CIP)	0.12–16	≥4	2	≤1	CLSI (2020)
Colistin (COL)	2–6	≥4	-	≤2	EUCAST (2019)
Gentamicin (GEN)	1–64	≥16	8	≤4	CLSI (2020)
Meropenem (MEM)	0.25–4	≥4	2	≤1	CLSI (2020)
Nalidixic acid (NAL)	2–128	≥32	-	≤16	CLSI (2020)
Streptomycin (STR)	16–128	≥32	-	≤16	NARMS (2021)
Sulfisoxazole (FIS)	16–256	≥512	-	≤256	CLSI (2020)
Tetracycline (TET)	2–128	≥16	8	≤4	CLSI (2020)
Trimethoprim/sulfamethoxazole (SXT)	0.12/2.38–4/76	≥4/76	-	≤2/38	CLSI (2020)

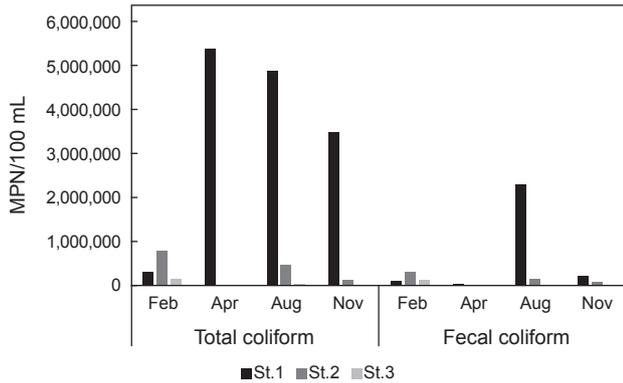


Fig. 2. Level of total coliform and Fecal coliform of inland pollution sources in the Southern Coastal Area of Ganghwa Island, South Korea.

결과 및 고찰

계절변화에 따른 분변오염세균의 오염도

강화도 남부 해역 인근 육상오염원 배출수의 분변오염도를 평가하기 위하여 2021년 4월부터 11월까지 총 3개 육상오염원 배출지점에서 12개의 시료를 채취하였다. 해당 육상오염원의 위치와 특성은 Fig. 1 및 Table 1에 제시하였으며, 대장균군 및 분변계대장균 분석 결과는 Fig. 2에 나타내었다. 조사 지점별 대장균군 및 분변계대장균의 범위는 각각 St. 1에서 330,000–5,400,000 MPN/100 mL 및 49,000–2,300,000 MPN/100 mL, St. 2에서 14,000–790,000 MPN/100 mL 및 3,300–330,000 MPN/100 mL, St. 3에서 13,000–170,000 MPN/100 mL 및 1,700–130,000 MPN/100 mL이었으며, 대장균군 수가 가장 높게 검출된 지점은 St. 1로 5,400,000 MPN/100 mL을 나타내었고 St. 2, St. 3 순으로 높았다. 또한 분변계대장균 결과도 St. 1에서 2,300,000 MPN/100 mL으로 가장 높게 검출되었고 St. 2, St. 3순으로 높아 대장균군과 동일한 경향을 보였다.

강화도 남부 해역은 상류에 배수유역이 넓게 펼쳐져 있으며, 하수처리시설의 보급률이 낮아 육상오염원에 대한 적절한 위생관리가 요구되는 해역이다. 강화도 남부 해역은 상류에 배수유역이 넓게 분포되어 있으며, 해역과 인접한 지역의 하수처리시설 보급률이 0%로 나타나 육상오염원에 대한 적절한 위생관리가 요구되는 해역이다. 특히, 대장균군 및 분변계대장균의 오염도가 가장 높은 St. 1은 인근에 해수욕장 및 펜션 등과 같은 숙박시설로 인해 관광객의 왕래가 많은 곳에 위치하고 있어 처리되지 않은 오염물질이 해역으로 직접 유입되는 것으로 파악되었다. 특히, 여름철인 8월에 분변계대장균 수치가 유독 높게 나타났는데, 이는 계절 영향 상 많은 경우와 관광객 증가로 인해 주변 오염물질이 더 많이 유입되기 때문인 것으로 판단된다. 인근에 농경지, 새우양식장이 위치하고 있는 St. 2, St. 3 또한 농업용수, 양식용수 뿐만 아니라 생활용수가 배출되는 펜션 및 인가

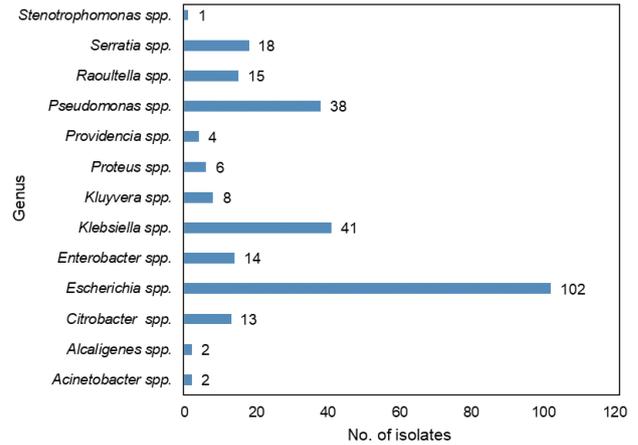


Fig. 3. Number of total Gram-negative bacteria isolated from inland pollution sources in the Southern Coastal Area of Ganghwa Island, South Korea.

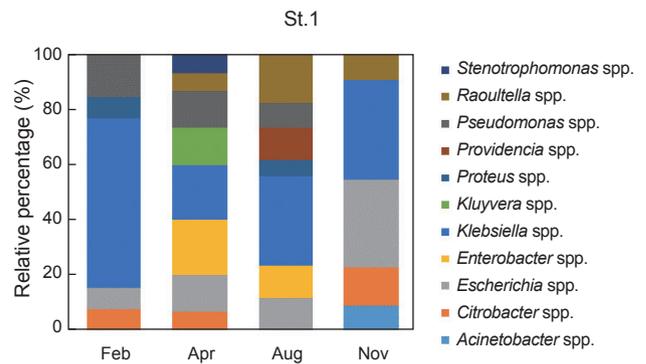


Fig. 4. Relative monthly percentage of bacteria isolated from inland pollution sources (station No. 1) in the Southern Coastal Area of Ganghwa Island, South Korea.

등이 위치하고 있는 지점이기 때문에 높은 오염도를 나타내었을 것으로 판단된다.

본 연구에서의 육상오염원 세균학적 오염도를 보면, 인근에 관광객의 왕래가 많거나 펜션 등 인가 비율이 높을수록 오염도가 높은 경향을 나타내었다. Shin et al. (2018)에 따르면 남해안 강진만 인근 육상오염원 배출수의 대장균군, 분변계대장균 오염도를 확인한 결과, 인구밀집 지역에서 더 높은 분변오염도를 나타낸다고 보고하였다. Kwon et al. (2019)에 따르면 자란만 사량도 해역 주변 육상오염원 배출수의 분변계대장균 및 대장균 오염도를 확인한 결과, 마을하수처리장이 가동되고 있지 않으면서 인가가 밀집된 지역의 육상오염원이 미처리된 오염물질들에 의해 오염도가 높게 나타났다고 보고하였다. Park et al. (2021)에 따르면 태안군 이원면 인근 육상오염원 배출수의 대장균군 및 분변계대장균 오염도를 확인한 결과 주변에 해수욕

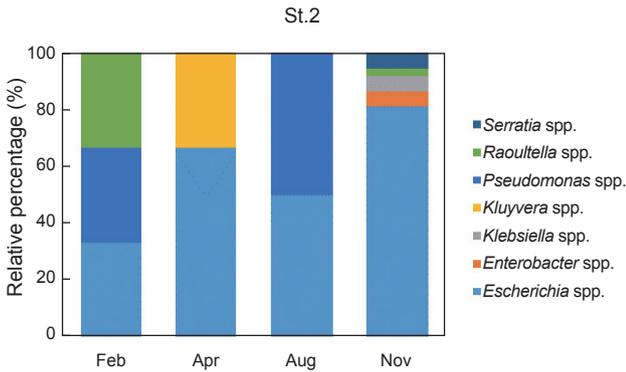


Fig. 5. Relative monthly percentage of bacteria isolated from inland pollution sources (station No. 2) in the Southern Coastal Area of Ganghwa Island, South Korea.

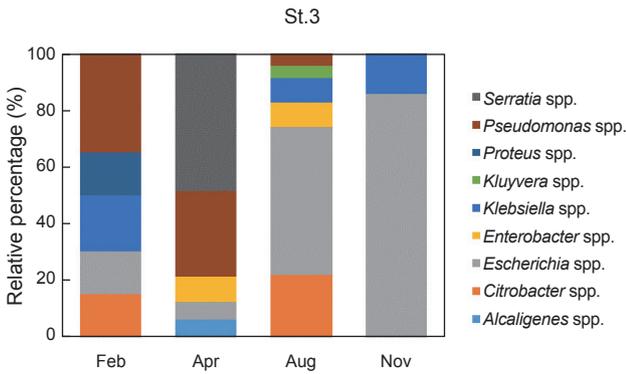


Fig. 6. Relative monthly percentage of bacteria isolated from inland pollution sources (station No. 3) in the Southern Coastal Area of Ganghwa Island, South Korea.

장 및 숙박시설이 있어 관광객의 출입이 잦은 육상오염원의 오염도가 가장 높게 나타났다고 보고하였다. 이와 같은 연구 결과를 통해 해역 인근 지역의 하수처리가 되지 않은 육상오염원 배출수가 해역으로 직접 유입되어 오염될 가능성이 있음을 확인하였다. 이에 따라 환경 관리에 대한 지속적인 관심과 적절한 오염원의 관리가 필요할 것으로 사료된다.

강화도 남부 해역 인근 육상오염원 중 그람음성세균의 검출 및 분리 현황

2021년 4월부터 11월까지 강화도 남부 해역 인근 육상오염원 배출수 3개소에서 분리한 그람음성세균의 검출 현황을 Fig. 3에 나타내었다. 총 264개 균주(13 genus)가 분리되었으며, *Escherichia* spp. (총 102균주), *Klebsiella* spp. (총 41균주), *Pseudomonas* spp. (총 38균주), *Serratia* spp. (총 18균주), *Raoultella* spp. (총 15균주), *Enterobacter* spp. (총 14균주), *Citrobacter* spp. (총 13균주) 순으로 분리되었으며, *Kluyvera* spp., *Proteus*

Table 3. Number of bacteria used in antimicrobial resistance tests isolated from inland pollution source of west coast of Korea

Genus	Inland pollution source			Total
	St.1	St.2	St.3	
<i>Citrobacter</i> spp.	5	0	8	13
<i>Escherichia</i> spp.	12	19	15	46
<i>Enterobacter</i> spp.	4	2	5	11
<i>Klebsiella</i> spp.	19	2	8	29
<i>Proteus</i> spp.	3	0	2	5
<i>Pseudomonas</i> spp.	6	8	13	27
<i>Raoultella</i> spp.	8	4	0	12
<i>Serratia</i> spp.	0	2	5	7
Total	57	37	56	150

Table 4. Antimicrobial resistance of gram-negative bacteria isolated from inland pollution sources (station No. 1) in the Southern Coastal Area of Ganghwa Island, South Korea

	Resistant (%)				Total (%)
	February	April	August	November	
AmC	5 (71.4)	8 (66.7)	17 (85.0)	0 (0.0)	30 (52.6)
AMP	6 (85.7)	10 (83.3)	18 (90.0)	4 (22.2)	38 (66.7)
FEP	5 (71.4)	2 (16.7)	13 (65.0)	0 (0.0)	20 (35.1)
FOX	6 (85.7)	8 (66.7)	17 (85.0)	4 (22.2)	35 (61.4)
CAZ	2 (28.6)	1 (8.3)	4 (20.0)	0 (0.0)	7 (12.3)
XNL	7 (100.0)	9 (75.0)	20 (100.0)	1 (5.6)	37 (64.9)
CHL	2 (28.6)	3 (25.0)	7 (35.0)	0 (0.0)	12 (21.1)
CIP	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)
COL	5 (71.4)	1 (8.3)	15 (75.0)	3 (16.7)	24 (42.1)
GEN	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)
MEM	5 (71.4)	1 (8.3)	13 (65.0)	0 (0.0)	19 (33.3)
NAL	4 (57.1)	2 (16.7)	13 (65.0)	0 (0.0)	19 (33.3)
STR	3 (42.9)	2 (16.7)	3 (15.0)	0 (0.0)	8 (14.0)
FIS	7 (100.0)	8 (66.7)	19 (95.0)	3 (16.7)	37 (64.9)
TET	5 (71.4)	1 (8.3)	11 (55.0)	2 (11.1)	19 (33.3)
SXT	5 (71.4)	2 (16.7)	12 (60.0)	0 (0.0)	19 (33.3)

AmC, Amoxicillin/clavulanic acid; AMP, Ampicillin; FEP, Cefepime; FOX, Cefoxitin; CAZ, Ceftazidime; XNL, Ceftiofur; CHL, Chloramphenicol; CIP, Ciprofloxacin; COL, Colistin; GEN, Gentamicin; MEM, Meropenem; NAL, Nalidixic acid; STR, Streptomycin; FIS, Sulfisoxazole; TET, Tetracycline; SXT, Trimethoprim/sulfamethoxazole.

spp., *Providencia* spp., *Acinetobacter* spp., *Alcaligenes* spp., *Stenotrophomonas* spp.도 분리되었다. 이 중 221개 균주(9 genus: *Escherichia* spp., *Klebsiella* spp., *Serratia* spp., *Raoultella* spp., *Enterobacter* spp., *Citrobacter* spp., *Kluyvera* spp., *Pro-*

teus spp., *Providencia* spp.)는 장내세균과(Enterobacteriaceae)에 속하고, 43개 균주(4 genus: *Pseudomonas* spp., *Acinetobacter* spp., *Alcaligenes* spp., *Stenotrophomonas* spp.)는 기타 환경 관련 미생물에 속한다. Kim et al. (2024)에 따르면 광주지역 공공수역의 미생물 군집 다양성을 MALDI-TOF MS로 분석해 본 결과, 그람음성세균은 *Aeromonas* spp., *Escherichia* spp., *Pseudomonas* spp., *Raoultella* spp., *Klebsiella* spp. 순으로 분리가 많이 되었다고 보고하고 있는데, *Aeromonas* spp.을 제외하고는 질량 분석을 통한 미생물 동정 결과와 본 연구의 결과가 유사하였다. 본 연구에서는 특히 *Escherichia* spp., *Klebsiella* spp., *Pseudomonas* spp. 순으로 분리가 많이 되었는데, *Escherichia* spp.는 대표적인 장내세균으로, 수질 및 식품 위생학적 평가에서 분변오염의 지표로 사용된다. 대부분의 종은 비병원성이지만, *E. coli* O157:H7과 같은 특정 혈청형은 병원성을 나타내는 것으로 보고되어 있다(Kaper et al., 2004). *Klebsiella* spp.는 장내세균과에 속하는 자연에 널리 퍼져 있는 세균으로, *K. pneumoniae*와 *K. oxytoca* 같은 병원성 세균은 급성 폐렴과 패혈증을 유발할 수 있다(Zhong et al., 2013; Jung et al., 2016;

Latifpour et al., 2016). 본 연구에서는 이와 같은 병원성을 가진 *K. pneumoniae*와 *K. oxytoca*도 분리되었다. *Pseudomonas* spp.은 자연계에 널리 분포하고 있고, 대표적으로 녹농균(*Pseudomonas aeruginosa*)이 있으며, 일부 종에서는 면역력이 약한 사람에게는 위해를 입히는 기회감염을 일으킬 수 있는 것으로 알려져있다(Kim et al., 2024).

강화도 남부 해역 육상오염원의 계절적 변화에 따른 세균상 변동을 확인하기 위하여 월별로 분리된 genus를 Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6에 나타내었다. St. 1에서는 총 84균주(11 genus)가 분리되었고, *Klebsiella* spp.가 30균주(35.7%)로 가장 많았으며 *Escherichia* spp. 14균주(16.7%), *Raoultella* spp. 9균주(10.7%), *Pseudomonas* spp. 7균주(8.3%) 순으로 분리되었다. 2월에는 *Klebsiella* spp. (61.5%)가 우점종으로 나타났고, 4월에는 *Klebsiella* spp. (20.0%), *Enterobacter* spp. (20.0%)가, 8월, 11월에도 *Klebsiella* spp. (32.4%, 36.4%)가 우점종으로 나타나 St. 1에서는 계절적 변화와 상관없이 *Klebsiella* spp.가 우점하는 것으로 나타났다. St. 2에서는 총 83균주(7 genus)가 분리되었고, *Escherichia* spp.가 53균주(63.9%)로

Table 5. Antimicrobial resistance of gram-negative bacteria isolated from inland pollution sources (station No. 2) in the Southern Coastal Area of Ganghwa Island, South Korea

	Resistant (%)				Total (%)
	February	April	August	November	
AmC	6 (66.7)	0 (0.0)	6 (54.5)	4 (33.3)	16 (43.2)
AMP	9 (100.0)	0 (0.0)	6 (54.5)	7 (58.3)	22 (59.5)
FEP	3 (33.3)	0 (0.0)	3 (27.3)	2 (16.7)	8 (21.6)
FOX	5 (55.6)	0 (0.0)	6 (54.5)	3 (25.0)	14 (37.8)
CAZ	4 (44.4)	0 (0.0)	2 (18.2)	0 (0.0)	6 (16.2)
XNL	9 (100.0)	1 (20.0)	11 (100.0)	2 (16.7)	23 (62.2)
CHL	6 (66.7)	0 (0.0)	6 (54.5)	0 (0.0)	12 (32.4)
CIP	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)
COL	2 (22.2)	0 (0.0)	3 (27.3)	2 (16.7)	7 (18.9)
GEN	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)
MEM	3 (33.3)	0 (0.0)	4 (36.4)	2 (16.7)	9 (24.3)
NAL	5 (55.6)	5 (100.0)	6 (54.5)	1 (8.3)	17 (45.9)
STR	3 (33.3)	0 (0.0)	6 (54.5)	2 (16.7)	11 (29.7)
FIS	9 (100.0)	3 (60.0)	11 (100.0)	2 (16.7)	25 (67.6)
TET	6 (66.7)	0 (0.0)	6 (54.5)	3 (25.0)	15 (40.5)
SXT	6 (66.7)	0 (0.0)	6 (54.5)	1 (8.3)	13 (35.1)

AmC, Amoxicillin/clavulanic acid; AMP, Ampicillin; FEP, Cefepime; FOX, Cefoxitin; CAZ, Ceftazidime; XNL, Ceftiofur; CHL, Chloramphenicol; CIP, Ciprofloxacin; COL, Colistin; GEN, Gentamicin; MEM, Meropenem; NAL, Nalidixic acid; STR, Streptomycin; FIS, Sulfisoxazole; TET, Tetracycline; SXT, Trimethoprim/sulfamethoxazole.

Table 6. Antimicrobial resistance of gram-negative bacteria isolated from inland pollution sources (station No. 3) in the Southern Coastal Area of Ganghwa Island, South Korea

	Resistant (%)				Total(%)
	February	April	August	November	
AmC	17 (100.0)	14 (87.5)	3 (20.0)	5 (62.5)	39 (69.6)
AMP	17 (100.0)	14 (87.5)	7 (46.7)	6 (75.0)	44 (78.6)
FEP	17 (100.0)	10 (62.5)	1 (6.7)	5 (62.5)	33 (58.9)
FOX	17 (100.0)	11 (68.8)	8 (53.3)	6 (75.0)	42 (75.0)
CAZ	1 (5.9)	6 (37.5)	0 (0.0)	0 (0.0)	7 (12.5)
XNL	17 (100.0)	15 (93.8)	3 (20.0)	5 (62.5)	40 (71.4)
CHL	9 (52.9)	9 (56.3)	2 (13.3)	2 (25.0)	22 (39.3)
CIP	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)
COL	17 (100.0)	11 (68.8)	0 (0.0)	6 (75.0)	34 (60.7)
GEN	0 (0.0)	0 (0.0)	1 (6.7)	1 (12.5)	2 (3.6)
MEM	17 (100.0)	14 (87.5)	0 (0.0)	4 (50.0)	35 (62.5)
NAL	3 (17.6)	9 (56.3)	3 (20.0)	1 (12.5)	16 (28.6)
STR	4 (23.5)	5 (31.3)	2 (13.3)	1 (12.5)	12 (21.4)
FIS	17 (100.0)	10 (62.5)	2 (13.3)	6 (75.0)	35 (62.5)
TET	10 (58.8)	6 (37.5)	2 (13.3)	3 (37.5)	21 (37.5)
SXT	4 (23.5)	9 (56.3)	2 (13.3)	3 (37.5)	18 (32.1)

AmC, Amoxicillin/clavulanic acid; AMP, Ampicillin; FEP, Cefepime; FOX, Cefoxitin; CAZ, Ceftazidime; XNL, Ceftiofur; CHL, Chloramphenicol; CIP, Ciprofloxacin; COL, Colistin; GEN, Gentamicin; MEM, Meropenem; NAL, Nalidixic acid; STR, Streptomycin; FIS, Sulfisoxazole; TET, Tetracycline; SXT, Trimethoprim/sulfamethoxazole.

가장 많았으며 *Pseudomonas* spp. 13균주(15.7%), *Raoultella* spp. 6균주(7.2%) 및 *Kluyvera* spp. 5균주(6.0%)순으로 분리되었다. 2월에는 *Escherichia* spp. (33.3%), *Pseudomonas* spp. (33.3%), *Raoultella* spp. (33.3%)가 우점종으로 나타났고, 4월에는 *Escherichia* spp. (66.7%)가, 8월에는 *Escherichia* spp. (50.0%), *Pseudomonas* spp. (50.0%)가, 11월에도 *Escherichia* spp. (81.1%)가 우점종으로 나타나 St. 2에서는 *Escherichia* spp.가 지속적으로 우점하고 있는 것으로 나타났다. St. 3에서는 총 97균주(9 genus)가 분리되었고, 그 중 *Escherichia* spp.가 35균주(36.1%)로 가장 많았으며 *Pseudomonas* spp. 18균주(18.6%), *Serratia* spp. 16균주(16.5%) 및 *Klebsiella* spp. 9균주(9.3%)순으로 많이 분리되었다. 2월에는 *Pseudomonas* spp. (35.5%)가 우점종으로 나타났고, 4월에는 *Serratia* spp. (48.5%), 8, 11월에는 *Escherichia* spp. (52.2%, 85.7%)가 우점종으로 나타나 St. 3에서는 관광객의 왕래가 적은 시기인 2, 4월에 환경유래미생물인 *Pseudomonas* spp.의 비중이 높은 편으로

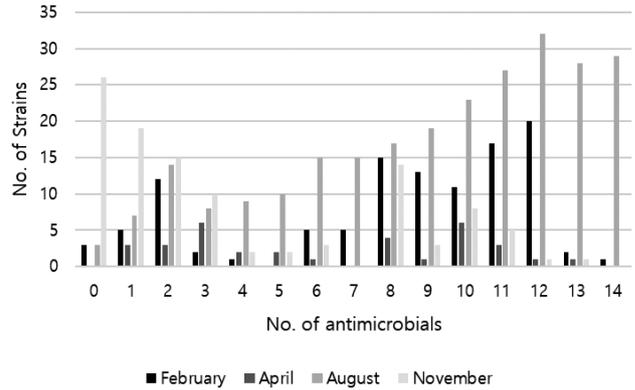


Fig. 7. Number of antimicrobial resistance of Gram-Negative bacteria isolated from inland pollution sources in the southern coast of Ganghwa Island.

Table 7. Multiple antimicrobial resistance (MAR) of gram-negative bacteria isolated from inland pollution sources in February

No. of antimicrobials	Resistance patterns	No. of isolates	Total (%)	MAR index
2	XNL, FIS	1	3.0	0.13
6	AmC, AMP, FEP, XNL, MEM, FIS	1	3.0	0.38
7	AMP, FOX, XNL, CHL, NAL, FIS, SXT	1	3.0	0.44
	AmC, AMP, FEP, FOX, XNL, MEM, FIS	1	3.0	
8	AMP, CAZ, XNL, CHL, NAL, FIS, TET, SXT	3	9.1	0.50
	AmC, AMP, FEP, FOX, XNL, COL, MEM, FIS	4	12.1	
9	AmC, AMP, FOX, XNL, CHL, STR, FIS, TET, SXT	2	6.1	0.56
	AmC, AMP, FEP, FOX, XNL, COL, MEM, NAL, FIS	2	6.1	
	AmC, AMP, FEP, FOX, XNL, COL, MEM, STR, FIS	1	3.0	
	AmC, AMP, FEP, FOX, XNL, COL, MEM, FIS, TET	1	3.0	
10	AmC, AMP, FEP, FOX, XNL, CHL, COL, MEM, FIS, TET	3	9.1	0.63
	AmC, AMP, FEP, FOX, CAZ, XNL, COL, MEM, FIS, TET	1	3.0	
11	AmC, AMP, FEP, FOX, CAZ, XNL, COL, MEM, NAL, FIS, TET	1	3.0	0.69
	AmC, AMP, FEP, FOX, XNL, COL, MEM, STR, FIS, TET, SXT	1	3.0	
	AmC, AMP, FEP, FOX, XNL, CHL, COL, MEM, STR, FIS, TET	2	6.1	
	AmC, AMP, FEP, FOX, XNL, CHL, COL, MEM, NAL, FIS, SXT	1	3.0	
	AmC, AMP, FEP, FOX, XNL, CHL, COL, MEM, FIS, TET, SXT	1	3.0	
	AmC, AMP, FEP, FOX, CAZ, XNL, COL, MEM, NAL, FIS, TET, SXT	1	3.0	
12	AmC, AMP, FEP, FOX, XNL, CHL, COL, MEM, STR, FIS, TET, SXT	2	6.1	0.75
	AmC, AMP, FEP, FOX, XNL, COL, MEM, NAL, STR, FIS, TET, SXT	1	3.0	
	AmC, AMP, FEP, FOX, XNL, CHL, COL, MEM, NAL, FIS, TET, SXT	1	3.0	
	AmC, AMP, FOX, CAZ, XNL, CHL, COL, NAL, STR, FIS, TET, SXT	1	3.0	
Total		33	100	-

AmC, Amoxicillin/clavulanic acid; AMP, Ampicillin; FEP, Cefepime; FOX, Cefoxitin; CAZ, Ceftazidime; XNL, Ceftiofur; CHL, Chloramphenicol; COL, Colistin; MEM, Meropenem; NAL, Nalidixic acid; STR, Streptomycin; FIS, Sulfisoxazole; TET, Tetracycline; SXT, Trimethoprim/sulfamethoxazole.

나타났다. 이처럼 3개 지점 모두 사람과 온혈동물 등의 분변에 존재하는 장내세균과 자연계의 물, 식물, 토양 등에 존재하는 환경 관련 미생물들이 주로 존재하는 것을 확인할 수 있었고, 지리적 요인, 시기적 요인 등 환경변화에 따라 세균상의 변동에 영향을 주고 있는 것으로 판단되었다. Park et al. (2021)에 따르면 태안군 이원면 인근 육상오염원 배출수에서도 장내세균과 환경 관련 미생물이 다수 발견되었다고 보고하였고, Wang et al. (2024)에서는 양쯔강 중하류의 지하수 샘플에서 다양한 미생물 군집을 Metagenome 염기서열 분석으로 확인한 결과, 장 관련 미생물과 생지화학적 순환에 관여하는 미생물을 모두 식별하였다. 이는 본 연구에서 장내세균(Enterobacteriaceae)과 다양한 환경 관련 미생물이 검출된 결과와 유사성을 보였다.

분리된 세균의 항생제 종류별 내성

강화도 남부 해역 인근 육상오염원 배출수 3개소에서 분리한 그람음성세균 중 항생제 내성 시험을 실시한 균주의 현황을 Table 3에 나타내었다. St. 1에서 57균주, St. 2에서 37균주, St.

3에서 56균주, 총 150개 균주를 항생제 내성 시험에 사용하였다. 총 8 genus가 시험에 사용되었고, *Escherichia* spp., *Klebsiella* spp., *Pseudomonas* spp., *Citrobacter* spp., *Raoultella* spp., *Enterobacter* spp., *Serratia* spp., *Proteus* spp. 순으로 분석 균주 수가 많았다.

St. 1의 57개 균주에 대한 항생제 종류별 내성을 월별로 구분하여 Table 4에 나타내었다. 항생제 내성율이 50% 이상인 항생제는 5종(amoxicillin/ clavulanic acid, ampicillin, cefoxitin, ceftiofur, sulfisoxazole)으로 나타났고, 2종(ciprofloxacin, gentamicin) 항생제에 대해서는 감수성을 나타내었다. 2월에는 항생제 내성율이 50% 이상인 항생제가 11종이었고, 4월은 5종, 8월은 11종으로 나타났으나, 11월은 내성율이 50% 이상인 항생제가 없었다. St. 2의 37개 균주에 대한 항생제 종류별 내성을 월별로 Table 5에 나타내었다. 항생제 내성율이 50% 이상인 항생제는 3종(amoxicillin/ clavulanic acid, ceftiofur, sulfisoxazole)으로 나타났고, 1종(gentamicin) 항생제에 대해서는 감수성을 나타내었다. 2월에는 항생제 내성율이 50% 이상인 항생

Table 8. Multiple antimicrobial resistance (MAR) of gram-negative bacteria isolated from inland pollution sources in April

No. of antimicrobials	Resistance patterns	No. of isolates	Total (%)	MAR index
1	CHL	1	3.0	0.06
	NAL	2	6.1	
2	NAL, FIS	2	6.1	0.13
	XNL, FIS	1	3.0	
3	AMP, XNL, FIS	2	6.1	0.19
	AmC, AMP, FOX	2	6.1	
	XNL, NAL, FIS	1	3.0	
	COL, STR, TET	1	3.0	
4	XNL, STR, FIS, TET	1	3.0	0.25
	AmC, AMP, FOX, XNL	1	3.0	
5	AmC, AMP, FOX, XNL, FIS	2	6.1	0.31
6	AmC, AMP, FEP, FOX, XNL, FIS	1	3.0	0.38
8	AmC, AMP, FOX, XNL, CHL, NAL, FIS, SXT	1	3.0	0.50
	AmC, AMP, FEP, CAZ, XNL, COL, MEM, TET	3	9.1	
9	AmC, AMP, FEP, FOX, CAZ, XNL, COL, MEM, TET	1	3.0	0.56
10	AmC, AMP, FEP, FOX, CAZ, XNL, COL, MEM, FIS, TET	1	3.0	0.63
	AmC, AMP, FEP, FOX, XNL, CHL, COL, MEM, NAL, SXT	1	3.0	
	AmC, AMP, FOX, XNL, CHL, MEM, NAL, STR, FIS, SXT	4	12.1	
11	AmC, AMP, FEP, FOX, XNL, CHL, COL, MEM, NAL, FIS, SXT	3	9.1	0.69
12	AmC, AMP, FEP, FOX, CAZ, XNL, CHL, COL, MEM, NAL, FIS, SXT	1	3.0	0.75
13	AmC, AMP, FEP, FOX, CAZ, XNL, CHL, COL, MEM, NAL, STR, FIS, SXT	1	3.0	0.81
Total		33	100	-

AmC, Amoxicillin/clavulanic acid; AMP, Ampicillin; FEP, Cefepime; FOX, Cefoxitin; CAZ, Ceftazidime; XNL, Ceftiofur; CHL, Chloramphenicol; COL, Colistin; MEM, Meropenem; NAL, Nalidixic acid; STR, Streptomycin; FIS, Sulfisoxazole; TET, Tetracycline; SXT, Trimethoprim/sulfamethoxazole.

제가 9종이었고, 8월은 10종, 11월은 1종으로 나타났으나, 4월은 내성율이 50% 이상인 항생제가 없었다. St. 3의 56개 균주에 대한 항생제 종류별 내성을 월별로 Table 6에 나타내었다. 항생제 내성율이 50% 이상인 항생제는 8종(amoxicillin/ clavulanic acid, ampicillin, cefepime, cefoxitin, ceftiofur, colistin, meropenem, sulfisoxazole)으로 나타났고, 1종(ciprofloxacin) 항생제에 대해서는 감수성을 나타내었다. 2월에는 항생제 내성율이 50% 이상인 항생제가 10종이었고, 4월도 10종, 11월은 8종으로 나타났으나, 8월은 1종으로 가장 적었다. 정점별로 항생제 내성율이 가장 낮은 계절은 St. 1에서는 11월, St. 2에서는 4

월, St. 3에서는 8월로 나타났고, 2월에는 모든 정점에서 항생제 내성률이 가장 높았다. Xiao et al. (2024)에 따르면 중국 동북부의 송화강에서는 병원, 학교, 시장 등 도시 활동의 영향이 집중되는 지역에서 다양한 항생제 내성균이 높은 비율로 검출되었으며, 계절에 따라 항생제 내성 양상이 뚜렷한 차이를 보인다고 보고하였다. 특히 봄철에는 내성균 검출 비율이 증가하는 경향을 보여, 본 연구에서 특정 시기 내성률이 급격히 높아진 결과와 유사한 양상을 나타내었다. 또한 Diwan et al. (2018)의 연구에서도 인도 Kshipra 강의 상·하류 지점에서 계절별로 수질 지표, 잔류 항생제, 항생제 내성균 및 내성 유전자의 농도가 변동함을

Table 9. Multiple antimicrobial resistance (MAR) of gram-negative bacteria isolated from inland pollution sources in August

No. of antimicrobials	Resistance patterns	No. of isolates	Total (%)	MAR index
0		3	6.5	0.00
1	NAL	2	4.3	0.06
	AMP	1	2.2	
	FOX	2	4.3	
2	XNL, FIS	7	15.2	0.13
	AMP, FOX	2	4.3	
	FOX, STR	1	2.2	
3	AMP, XNL, FIS	1	2.2	0.19
	AmC, AMP, FOX	1	2.2	
4	AmC, AMP, FOX, XNL	1	2.2	0.25
6	AmC, AMP, FOX, XNL, COL, FIS	1	2.2	0.38
	AmC, AMP, FEP, FOX, XNL, MEM	1	2.2	
	AmC, AMP, FOX, CAZ, XNL, FIS	1	2.2	
7	AmC, AMP, FOX, CAZ, XNL, COL, FIS	1	2.2	0.44
8	AMP, FEP, XNL, CHL, GEN, FIS, TET, SXT	1	2.2	0.50
9	AmC, AMP, FOX, XNL, CHL, COL, NAL, FIS, SXT	1	2.2	0.56
10	AmC, AMP, FEP, FOX, XNL, COL, MEM, NAL, FIS, TET	1	2.2	0.63
	AmC, AMP, FOX, XNL, CHL, NAL, STR, FIS, TET, SXT	2	4.3	
11	AmC, AMP, FEP, FOX, XNL, COL, MEM, NAL, FIS, TET, SXT	3	6.5	0.69
	AmC, AMP, FOX, XNL, CHL, COL, NAL, STR, FIS, TET, SXT	1	2.2	
	AmC, AMP, FOX, XNL, CHL, MEM, NAL, STR, FIS, TET, SXT	1	2.2	
12	AmC, AMP, FEP, FOX, XNL, CHL, COL, MEM, NAL, FIS, TET, SXT	3	6.5	0.75
	AmC, AMP, FEP, FOX, XNL, CHL, COL, MEM, NAL, STR, FIS, SXT	1	2.2	
	AmC, AMP, FEP, FOX, CAZ, XNL, COL, MEM, NAL, FIS, TET, SXT	2	4.3	
13	AmC, AMP, FEP, FOX, XNL, CHL, COL, MEM, NAL, STR, FIS, TET, SXT	3	6.5	0.81
	AmC, AMP, FEP, FOX, CAZ, XNL, CHL, MEM, NAL, STR, FIS, TET, SXT	1	2.2	
14	AmC, AMP, FEP, FOX, CAZ, XNL, CHL, COL, MEM, NAL, STR, FIS, TET, SXT	1	2.2	0.88
Total		46	100	-

AmC, Amoxicillin/clavulanic acid; AMP, Ampicillin; FEP, Cefepime; FOX, Cefoxitin; CAZ, Ceftazidime; XNL, Ceftiofur; CHL, Chloramphenicol; COL, Colistin; GEN, Gentamicin; MEM, Meropenem; NAL, Nalidixic acid; STR, Streptomycin; FIS, Sulfisoxazole; TET, Tetracycline; SXT, Trimethoprim/sulfamethoxazole.

Table 10. Multiple antimicrobial resistance (MAR) of Gram-Negative bacteria isolated from Inland pollution sources in November

No. of antimicrobials	Resistance patterns	No. of isolates	Total (%)	MAR index
0		13	34.2	0.00
1	AMP	3	7.9	0.06
	FIS	2	5.3	
	FOX	1	2.6	
	TET	1	2.6	
	XNL	1	2.6	
2	AMP, COL	1	2.6	0.13
	AMP, FIS	1	2.6	
	AMP, FOX	1	2.6	
	COL, FIS	1	2.6	
	FOX, COL	1	2.6	
	FOX, TET	1	2.6	
3	AmC, AMP, FOX	2	5.3	0.19
6	AMP, NAL, STR, FIS, TET, SXT	1	2.6	0.38
8	AmC, AMP, FEP, FOX, XNL, COL, MEM, FIS	3	7.9	0.50
	AmC, AMP, FEP, FOX, XNL, COL, MEM, TET	1	2.6	
	AmC, AMP, FEP, XNL, COL, MEM, STR, TET	1	2.6	
9	AMP, FOX, COL, GEN, NAL, STR, FIS, TET, SXT	1	2.6	0.56
10	AmC, AMP, FEP, FOX, XNL, CHL, COL, FIS, TET, SXT	1	2.6	0.63
11	AmC, AMP, FEP, FOX, XNL, CHL, COL, MEM, FIS, TET, SXT	1	2.6	0.69
Total		38	100	-

AmC, Amoxicillin/clavulanic acid; AMP, Ampicillin; FEP, Cefepime; FOX, Cefoxitin; XNL, Ceftiofur; CHL, Chloramphenicol; COL, Colistin; GEN, Gentamicin; MEM, Meropenem; NAL, Nalidixic acid; STR, Streptomycin; FIS, Sulfisoxazole; TET, Tetracycline; SXT, Trimethoprim/sulfamethoxazole.

보고하였으며, 가축 사육 및 농업 활동이 활발한 지역에서 높은 내성율이 확인되어, 본 연구의 조사 정점별 특징 차이와도 연관성이 있을 것으로 사료된다. 이러한 선행연구들과 비교했을 때, 본 연구에서 관찰된 항생제 내성 양상의 정점별 차이는 단순한 계절적 영향보다는 각 오염원의 특성(예: 인구 밀집도, 축산활동 등)에 의해 영향을 받은 것으로 사료된다.

계절적 변화에 따른 세균의 항생제 내성 패턴 및 다제 내성

강화도 남부 해역 인근 육상오염원 배출수 3개소에서 분리한 그람음성세균 150개 균주의 계절적 변화에 의한 항생제 내성 패턴 및 MAR index를 Tables 7-10에 나타내었다. MAR index는 항생제로 인한 환경오염정도를 반영하여 잠재적인 건강위해도 평가에서 사용되는 지표로, MAR index가 0.2 이상, 즉 4종 이상 항생제에 대해 내성을 가질 경우 항생제에 대한 위험을 나타낸다(Titilawo et al., 2015). 먼저, 2월에 분리된 세균의 항생제 다제 내성 및 내성 패턴을 Fig. 7, Table 7에 나타내었다. 총 33개 균주 중 1개 균주를 제외한 32개 균주(97.0%)에서 MAR

index가 0.2 이상을 나타냈고, 이 중 2종(ceftiofur, sulfisoxazole)의 항생제에 모두 내성을 나타내었다. 또한, 8종 항생제(amoxicillin/clavulanic acid, ampicillin, cefepime, cefoxitin, chloramphenicol, colistin, meropenem, tetracycline)에 대해서 내성을 나타내는 균주가 50% 이상으로 나타났으며, 2종 항생제(ciprofloxacin, gentamicin)에 대해서는 모두 감수성을 나타내었다. 또한 항생제 내성 패턴이 2종 1개, 6종 1개, 7종 2개, 8종 2개, 9종 4개, 10종 2개, 11종 5개, 12종 5개로 다양하게 나타났다. 4월에 분리된 세균의 항생제 다제 내성 및 내성 패턴을 Fig. 7, Table 8에 나타내었다. 총 33개 균주 중 21개 균주(63.6%)에서 MAR index가 0.2 이상을 나타냈고, 이 중 5종 항생제(amoxicillin/clavulanic acid, ampicillin, cefoxitin, ceftiofur, sulfisoxazole)에 대해서 내성을 나타내는 균주가 50% 이상으로 나타났으며, 1종 항생제(gentamicin)에 대해서는 모두 감수성을 나타내었다. 또한 항생제 내성 패턴이 1종 2개, 2종 2개, 3종 4개, 4종 2개, 5종 1개, 6종 1개, 8종 2개, 9종 1개, 10종 3개, 11종 1개, 12종 1개, 13종 1개로 2월에 분리된 균주들과 비교했을 때, 내성 패턴 개수는 비슷하나, MAR index가 0.2 미만

인 내성 패턴 개수가 더 많았다. 8월에 분리된 세균의 항생제 다제 내성 및 내성 패턴을 Fig. 7, Table 9에 나타내었다. 총 46개 균주 중 26개 균주(56.5%)에서 MAR index가 0.2 이상을 나타냈고, 이 중 5종 항생제(amoxicillin/clavulanic acid, ampicillin, cefoxitin, ceftiofur, sulfisoxazole)에 대해서 내성을 나타내는 균주가 50% 이상으로 나타났으며, 이는 4월 시료의 분석 결과와 같았다. 또한 항생제 내성 패턴이 1종 3개, 2종 3개, 3종 2개, 4종 1개, 6종 3개, 7종 1개, 8종 1개, 9종 1개, 10종 2개, 11종 3개, 12종 3개, 13종 2개, 14종 1개로 내성 패턴이 가장 다양하게 나타났다. 11월에 분리된 세균의 항생제 다제 내성 및 내성 패턴을 Fig. 7, Table 10에 나타내었다. 총 38개 균주 중 9개 균주(23.7%)에서 MAR index가 0.2 이상을 나타내어 분리된 세균의 다제 내성률이 가장 낮게 나타났다. 50% 이상 내성을 나타내는 항생제는 없었으며, 2종 항생제(cefepime, ciprofloxacin)에 대해서는 모두 감수성을 나타내었다. 또한 항생제 내성 패턴이 1종 5개, 2종 6개, 3종 1개, 6종 1개, 8종 3개, 9종 1개, 10종 1개, 11종 1개로 내성 패턴 개수가 가장 적었다.

분리된 세균의 항생제 내성 패턴 및 다제 내성률은 항생제 내성률과 달리 계절적 변화에 따른 차이가 있었다. 11월 채취한 시료에서 분리한 세균의 내성 패턴 개수 및 다제 내성률이 다른 시기보다 모두 낮았다. Diwan et al. (2018)에 따르면 인도 중부의 Kshipra 강에서 분리한 대장균의 내성 및 다제 내성 패턴은 계절에 따라 크게 변동하며, 특히 여름철과 장마철에는 내성 박테리아와 내성 유전자가 더 많이 검출되는 것으로 보고하고 있다. 한편, Sun et al. (2020)에 따르면 일부 항생제만이 계절적 사용 증가에 따라 황색포도상구균과 대장균의 내성률에 강하게 영향을 미쳤지만, 다른 경우에는 상관관계가 뚜렷하지 않았다고 보고하고 있다. 이는 세균의 항생제 내성 특성은 계절적 변화와 상관관계가 일부 있을 수 있으나, 이 외에도 항생제 종류, 세균의 특성, 지역적 요인 등이 복합적으로 작용한다는 것을 보여준다.

또한 11월을 제외한 2, 4, 8월에 분리된 세균에서 항생제 5종(amoxicillin/clavulanic acid, ampicillin, cefoxitin, ceftiofur, sulfisoxazole)에 대해 50% 이상 내성을 나타내었으며, 따라서 위 5종 항생제가 강화도 남부 해역 인근 육상오염원 배출수에서 대표적으로 내성을 나타내는 항생제로 판단된다. Park et al. (2021)에 따르면 태안군 이원면 인근 육상오염원 배출수에서 분리한 다제 내성 균주는 amoxicillin/clavulanic acid, ampicillin, cefoxitin, ceftiofur, chloramphenicol, colistin, meropenem 등 7종의 항생제에서 높은 내성을 보였다고 보고하였다. 본 연구에서도 ampicillin, ceftiofur, amoxicillin/clavulanic acid, cefoxitin, sulfisoxazole, cefepime, colistin, meropenem 등 8종의 항생제에서 내성이 가장 많이 나타났으며, 이 중 chloramphenicol을 제외한 6종 항생제에서 Park et al. (2021)의 결과와 동일한 경향을 확인하였다. 이러한 유사성은 지역과 조사 시점이 다르더라도 특정 항생제에 대한 내성이 공통적으로 발현됨을 보여주며, 다제 내성 균주의 확산이 잠재적 위험 요인으로 작

용할 수 있음을 시사한다.

사 사

이 논문은 2025년 국립수산물과학원 수산과학연구소 수출패류 생산해역 및 수산물 위생조사(R2025055) 및 패류생산해역 위생조사(P2025003)의 지원으로 수행된 연구이며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- APHA (American Public Health Association). 1984. Laboratory Procedures for the Examination of Seawater and Shellfish. 5th Ed. APHA, Washington DC, U.S.A., 1-47.
- Chitanand MP, Kadam TA, Gyananath G, Totewad ND and Balhal DK. 2010. Multiple antibiotic resistance indexing of coliforms to identify high risk contamination sites in aquatic environment. *Indian J Microbiol* 50, 216-220. <http://doi.org/10.1007/s12088-010-0042-9>.
- CLSI (Clinical and Laboratory Standards Institute). 2020. Performance Standards for Antimicrobial Susceptibility Testing: M100 (30th Edition). CLSI, Wayne, PA, U.S.A.
- Diwan V, Hanna N, Purohit M, Chandran S, Riggi E, Parashar V, Tamhankar AJ and Lundborg CS. 2018. Seasonal variations in water-quality, antibiotic residues, resistant bacteria and antibiotic resistance genes of *Escherichia coli* isolates from water and sediments of the Kshipra River in central India. *Int J Environ Res Public Health* 15, 1281. <https://doi.org/10.3390/ijerph15061281>.
- EUCAST (The European Committee on Antimicrobial Susceptibility Testing). 2019. The European Committee on Antimicrobial Susceptibility Testing. Retrieved from <http://www.eucast.org/> on Oct 22, 2021.
- Ikehata K, Naghashkar NJ and El-Din MG. 2006. Degradation of aqueous pharmaceuticals by ozonation and advanced oxidation processes: A review. *Ozone Sci Eng* 28, 353-414. <https://doi.org/10.1080/01919510600985937>.
- Jung LS, Jo AR, Kim JJ and Ahn JH. 2016. Characteristics of *Klebsiella pneumoniae* exposed to serial antibiotic treatments. *Korean J Microbiol* 52, 428-436. <http://doi.org/10.7845/kjm.2016.6072>.
- Kaper JB, Nataro JP and Mobley HLT. 2004. Pathogenic *Escherichia coli*. *Nat Rev Microbiol* 2, 123-140. <http://doi.org/10.1038/nrmicro818>.
- Kim SJ, Park JY, Kim SH, Lim MH, Yu JY, Han KS, Park SI, Seo GY and Cho GW. 2024. A study on microbial community diversity and antibiotic resistance in Public waters in Gwangju. *J Environ Health Sci* 50, 93-101. <https://doi.org/10.5668/JEHS.2024.50.2.93>.
- Knapp CW, Dolfing J, Ehlert PA and Graham DW. 2010. Evidence of increasing antibiotic resistance gene abundances in archived soils since 1940. *Environ Sci Technol* 44, 580-587.

- <https://doi.org/10.1021/es901221x>.
- Krumperman PH. 1983. Multiple antibiotic resistance indexing of *Escherichia coli* to identify high-risk sources of fecal contamination of foods. *Appl Environ Microbiol* 46, 165-170. <https://doi.org/10.1128/aem.46.1.165-170.1983>.
- Kwon JY, Kwon SJ, Yang JH, Mok JS, Jeng SH, Ha GS, Lee HJ and Jung YJ. 2019. Antimicrobial resistance of *Escherichia coli* isolated from oysters *Crassostrea gigas* and major inland pollution sources in the Jaranman-Saryangdo area in Korea. *Korea J Fish Aquat Sci* 52, 605-616. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2019.0605>.
- Latifpour M, Gholipour A and Damavandi MS. 2016. Prevalence of extended-spectrum β -lactamase-producing *Klebsiella pneumoniae* isolates in nosocomial and community-acquired urinary tract infections. *Jundishapur J Microbiol* 9, e31179. <https://doi.org/10.5812/jjm.31179>.
- Lee EJ, Park JH, Lee GW and Kim DS. 2019. The use of broad-spectrum antibiotics and antibiotics to treat antimicrobial-resistant bacteria. *Yakhak Hoeji* 63, 43-53. <https://doi.org/10.17480/psk.2019.63.1.43>.
- MFDS (Ministry of Food and Drug Safety). 2020. Report of the National Antimicrobial Use and Resistance Monitoring - Animals and Livestock Products 2020. MFDS, Osong, Korea, 1-163.
- MFDS (Ministry of Food and Drug Safety). 2022. Report of the National Antimicrobial Use and Resistance Monitoring - Animals and Livestock Products 2022. MFDS, Osong, Korea, 1-163.
- NARMS (National Antimicrobial Resistance Monitoring System for Enteric Bacteria). 2021. National Antimicrobial Resistance Monitoring System for Enteric Bacteria. Retrieved from <https://www.cdc.gov/narms/index.html> on Apr 10, 2021.
- NPCC (National Policy Coordination Conference). 2016. National Action Plan on Antimicrobial Resistance (AMR) (2016-2020). Retrieved from <https://www.mhlw.go.jp/file/06-Seisakujouhou-10900000-Kenkoukyoku/0000138942.pdf> on Jun 5, 2021.
- Park BM, Kim MJ, Jeong YG, Park JI, Yu HS and Oh EG. 2021. Antimicrobial resistance characteristics of gram-negative bacteria isolated from inland pollution sources in the drainage basin of Iwonmyeon (Taeon-gun), South Korea. *Korean J Fish Aquat Sci* 54, 377-387. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2021.0377>.
- Roh HJ, Kim NE, Chun WK, Kim WK, Kim AR, Lee YH, Kim YJ, Hwang JY and Kim DH. 2018. Distribution of indicator bacteria in seawater off the Coasts of Jeju Island and Pohang in 2017. *Korean J Fish Aquat Sci* 51, 697-703. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2018.0697>.
- Shin SB, Lim CW, Lee JH and Jung SH. 2018. Evaluation of inland pollution sources impact in the Gangjin Bay, Korea. *J Kor Soc Fish Mar Edu* 30, 2241-2248. <https://doi.org/10.13000/JFMSE.2018.12.30.6.2241>.
- Sun DS, Kissler SM, Kanjilal S, Olesen SW, Lipsitch M and Grad YH. 2020. Large variation in the association between seasonal antibiotic use and resistance across multiple bacterial species and antibiotic classes. medRxiv. Version 1. <https://doi.org/10.1101/2020.12.21.20248670>.
- Titilawo Y, Sibanda T, Obi L and Okoh A. 2015. Multiple antibiotic resistance indexing of *Escherichia coli* to identify high-risk sources of fecal contamination of water. *Environ Sci Pollut Res* 22, 10969-10980. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3887-3>.
- Wang Y, Weng MY, Zhong JW, He L, Guo DJ, Luo D and Xue JY. 2024. Microbial metagenomics revealed the diversity and distribution characteristics of groundwater microorganisms in the middle and lower reaches of the Yangtze River basin. *Microorganisms* 12, 1551. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12081551>.
- WHO (World Health Organization). 2014. Antimicrobial Resistance: Global Report on Surveillance. Retrieved from <http://www.who.int/drugresistance/documents/surveillance-report/en/> on Jun 5, 2021.
- Xiao Q, Wang X, Wu C, Chen W, Huang Q and Wang X. 2024. Spatial distribution and seasonal variation of antibiotic-resistant bacteria in an urban river in northeast China. *Water* 16, 1268. <https://doi.org/10.3390/w16091268>.
- Zhong HQ, Zhang S, Pan H and Cai T. 2013. Influence of induced ciprofloxacin resistance on efflux pump activity of *Klebsiella pneumoniae*. *J Zhejiang Univ Sci B* 14, 837-843. <https://doi.org/10.1631/jzus.B1200221>.