

Original Article

하수도 시스템 변화와 그에 따른 환경관리해역 COD 농도 증가

박성식¹ · 김영운² · 김경민³ · 김경희^{4,†}

¹국립부경대학교 해양공학과 대학원생
²해양생태기술연구소 R&D총괄본부 본부장
³시즈오카대학 글로벌공창과학부 교수
⁴국립부경대학교 해양공학과 교수

Changes in Sewer Systems and the Resulting Increase in COD Concentration in Environmental Management Sea Areas

Seongsik Park¹, Young Ryun Kim², Kyeongmin Kim³, and Kyunghoi Kim^{4,†}

¹Graduate Student, Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

²General R&D Project Manager, Marine Eco-technology Institute, Busan 48520, Korea

³Professor, Faculty of Global Interdisciplinary Science and Innovation, Shizuoka University, Shizuoka 422-8529, Japan

⁴Professor, Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

요 약

감소 추세를 보이던 환경관리해역의 COD(chemical oxygen demand) 농도는 2010년 이후 증가 추세로 전환되었으며, 그 원인은 아직 명확히 밝혀지지 않았다. 본 연구에서는 하수도 시스템의 변화로 인한 도로유출수의 유입 증가가 주요 원인일 가능성이 높다고 판단된다. 최근 하수도 분류식화 사업의 진행에 따라 2010년을 기점으로 합류식 하수도는 감소하고, 분류식 하수도가 급격히 증가하였다. 분류식 하수도의 증가로 인해 미처리된 우수가 바다로 직접 방류되면서, COD 농도가 높은 도로유출수가 연안으로 유입되는 양이 늘어난 것으로 추정된다. 실제로, 환경관리해역의 COD 농도는 도로유출수 관련 지표들과 유의한 양의 상관성을 보였다. 회귀 분석을 통해 해역의 COD 농도를 0.1 mg/L 저감하기 위해 필요한 도로유출수 관련 지표 저감량을 제시하였으며, 이는 향후 COD 농도 저감 방안 수립에 기초 자료로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract – The declining trend of COD concentrations in environmental management areas reversed in 2010, showing an increase, though the cause remains unclear. This study suggests that the increase in road runoff due to changes in the sewer system may be the primary reason. Since 2010, sewer separation projects have led to a decrease in combined sewers and a sharp rise in separated sewers. The increase in separated sewers, which discharge untreated stormwater directly into the sea, likely resulted in a higher influx of road runoff with high COD concentrations into coastal areas. Indeed, COD concentrations in the environmental management areas showed a significant positive correlation with road runoff-related indicators. Through regression analysis, the study provides estimates for the reduction in road runoff indicators necessary to achieve a 0.1 mg/L decrease in COD concentration, which could serve as a basis for future COD reduction planning.

Keywords: Separate sewer system(분류식 하수도 시스템), Marine environmental monitoring system(해양환경 측정망), Environmental management areas(환경관리해역), Road runoff(도로유출수)

1. 서 론

환경관리해역은 연안 생태계를 보호하고 지속 가능한 이용을 도모하기 위해 설정된 구역으로, 해양 오염을 예방하고 수질을

개선하기 위한 법적·정책적 관리 체계가 적용된 해역을 말한다. 총 9개의 환경관리해역이 있으며, 이들은 다시 5개의 특별관리해역과 4개의 환경보전해역으로 구분된다. 특별관리해역은 해양 환경 기준의 유지가 어려워 해양 환경 보전에 현저한 장애가 있거나 장애를 초래할 우려가 있는 해역으로, 시화호·인천 연안, 광양만, 마산만, 부산 연안, 울산 연안이 이에 해당

[†]Corresponding author: hoikim@pknu.ac.kr

한다(Ministry of Oceans and Fisheries[2024]). 환경보전해역은 수산자원의 보호·육성을 위해 지정된 해역 또는 해양 환경 상태가 양호하여 지속적으로 보전할 필요가 있는 해역으로, 함평만, 완도-도암만, 득량만, 가막만이 포함된다. 이러한 해역들은 해양 생태계의 건강성을 유지하고, 지역 주민의 생활 환경과 어업 생산성에 중요한 영향을 미친다. 특히, 산업화와 도시화로 인한 오염 부하가 높은 지역에서 환경관리해역의 역할은 더욱 중요해진다. 2000년 2월 환경관리해역이 지정된 이후 해역별 COD 농도는 감소하는 추세를 보였으나, 2010년 이후 원인 불명의 이유로 다시 증가하는 추세를 보이고 있다(Jun *et al.* [2018]).

연안 COD 농도 증가에 기여할 수 있는 요인 중 하나로 도로 유출수가 있다. 도로유출수는 강우 시 도로 표면을 따라 흐르며 유출되는 빗물로, 도로에 축적된 다양한 오염 물질을 포함한다(Lee and Bang[2000]). 이러한 유출수에는 자동차 배출물, 타이어 마모 입자, 기름, 중금속, 그리고 기타 무기 및 유기 오염 물질이 포함될 수 있다(Buzas and Lomlyody[1997]). 도로유출수는 비점오염원의 주요 원인 중 하나로, 연안 및 하천 생태계에 유입될 경우 수질 오염을 초래할 수 있다. 특히, 도로유출수에 포함된 유기물질은 대부분 난분해성 유기물질(refractory organic matters)로, 그 COD 농도는 40~931 mg/L이며(Lee *et al.*[2005]), 강우 시와 비강우 시의 TOC 농도는 각각 8.50~15.56 mg/L, 1.34~4.30 mg/L에 달한다(Characklis and Wiesner[1997]).

도로유출수는 도로변에 설치된 개방형 배수로인 측구를 통해 하수관거로 운반된다. 하수관거 시스템은 합류식과 분류식으로 나뉜다. 합류식 하수도는 오수와 우수를 동일한 관거를 통해 하수처리장으로 운반한 후 정화하여 방류한다. 반면, 분류식 하수도는 오수와 우수를 별개 관거로 운반하며, 오수는 하수처리장을 거쳐 방류되고, 우수는 공공수역인 하천이나 바다로 그대로 방류된다(Butler and Davies[2010]). 초기 도시 개발에서는 주로 합류식 하수도가 도입되었으나, 강우 시 하수도 용량 초과로 인해 미처리된 상태로 공공수역으로 방류되는 하수관거 월류수(combined sewer overflows) 문제로 인해, 최근 개발되거나 재개발되는 지역에서는 분류식 하수도 시스템을 채택하는 경우가 늘고 있다. 그러나, 분류식 하수도가 늘어남에 따라 미처리 우수가 공공수역으로 방류되는 문제가 발생할 수 있으며, 이로 인해 미처리된 도로유출수가 연안으로 유입될 우려가 있다(Walsh *et al.*[2016]). 실제로, Brombach *et al.*[2005]의 연구 결과에 따르면, 분류식 하수도의 COD와 TOC 부하량은 합류식 하수도에 비해 높은 것으로 나타났다.

환경관리해역의 COD 농도는 최근 증가 추세를 보이고 있으며, 그 원인을 규명하기 위해 도로유출수와 상관성을 분석할 필요가 있다. 그러나 국내에서는 도로유출수의 수질과 발생량과 같은 자료가 생산되지 않고 있다. 이에 대한 대안으로 도로유출수 관련 지표가 사용될 수 있으며, 도로유출수의 COD 연안 유입 부하량은 강수량, 교통량, 그리고 분류식 하수도 측구

연장(SSSDL; separate sewer side drain length)과 같은 도로유출수 관련 지표들로 설명될 수 있다(Butler and Davies[2010]). 본 연구에서는 환경관리해역별 COD 농도와 도로유출수 관련 지표의 시계열 변화를 분석하고, 두 자료 간의 상관성을 계산하였다. 이후 도로유출수 지표와 해역 COD 농도 간의 회귀 분석을 통해 해역별 0.1 mg/L의 COD 농도 저감을 위해 필요한 도로유출수 저감량을 제시하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 Data

9개의 환경관리해역은 5개의 특별관리해역과 4개의 환경보전해역으로 나뉜다(Fig. 1). 특별관리해역에는 시화호-인천 연안, 광양만, 마산만, 부산 연안, 울산 연안이 포함되며, 환경보전해역은 함평만, 완도-도암만, 득량만, 가막만으로 구성된다. 이중 시화호-인천 연안은 경기-인천 지역에 위치하고 있으며, 광양만과 4개의 환경보전해역은 전남에, 마산만과 부산 연안은 경남에, 그리고 울산 연안은 울산에 위치하고 있다. 해양환경공단이 운영하는 해양환경측정망에서는 매년 분기별(1997년~현재, 2, 5, 8, 11월) 환경관리해역의 표·저층 수질과 매년 2월(2011년~현재) COD를 포함한 퇴적물 일반항목을 모니터링하고 있다. 환경관리해역 내 해양환경측정망 정점 위치와 인근 기상청 종관기상관측의 강수량 정점 위치를 Fig. 1에 나타내었다. 해양환경측정망 관측 자료는 해양환경정보포털(<https://www.meis.go.kr/portal/main.do>)에서 얻을 수 있으며, 강수량 자료는 기상청 기상자료개방포털(<https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do>)에서 얻을 수 있다.

본 연구에서 사용된 도별 교통량 자료는 도별 조사 지점에서 조사된 일교통량 값들의 평균으로, 도별 하루에 한 지점에서 평균적으로 운행되는 차량 대수를 의미한다. 해역별 교통량(대/day)과 포장도로 연장 자료(PRL; Paved road length; km)는 해당 해역이 위치한 도의 자료를 사용하였다. 예를 들어, 시화호-인천 연안은 경기도 자료를 사용했으며, 마산만은 경남 자료를 사용하였다. 도별 교통량 자료는 국토교통부와 한국건설기술연구원에서 운영하는 교통량정보제공시스템(<https://www.road.re.kr/>)에서 얻을 수 있으며, 그 자료는 도로교통량통계연보를 출처로 한다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport[2024a]). 도별 포장도로 연장(km)은 도로현황조사 자료를 사용하였으며, 도로현황조사는 행정안전부 국가기록원(<https://contents.archives.go.kr/next/viewMainNew.do>)에서 얻을 수 있다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport[2024b]).

시·도별 합류식 하수도 측구 연장(m)과 분류식 하수도 측구 연장(m) 자료는 환경부의 하수도 통계 자료 중 하수관거(총괄, 2005~2022년) 자료를 사용하였으며, 하수처리장 방류량(m³/day) 자료는 하수도 통계 자료 중 하수처리장 현황(총괄, 1991~2022년) 자료를 사용하였다(Ministry of Environment[2024]).

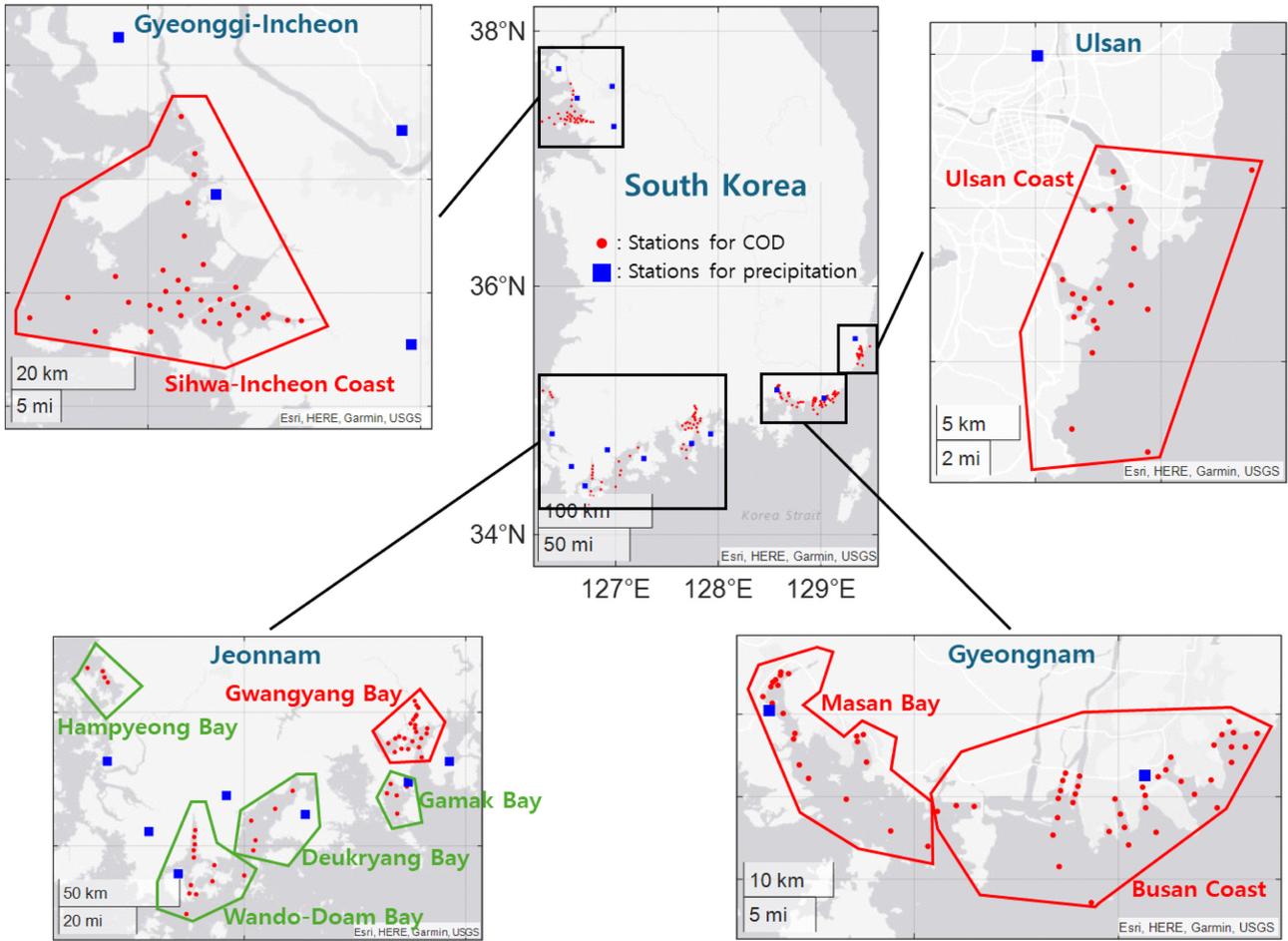


Fig. 1. Map of Special Management Areas (outlined in red) and Environmental Conservation Areas (outlined in green). Red dots indicate marine environmental monitoring stations within the areas, and blue squares represent precipitation monitoring points.

2.2 환경관리지역 COD 농도 저감을 위한 도로유출수 관련 지표의 필요 저감량 계산

해역별 교통량과 포장도로 연장 대비 분류식 하수도 측구 연장(SSSDL/PRL; m/km)을 독립변수로 하여 COD 농도 예측 선형 회귀 분석을 수행하였다. 그리고 그 회귀 계수를 바탕으로 0.1 mg/L의 COD 농도 저감을 위해 필요한 교통량 및 SSSDL/PRL 저감량을 계산하였다. 또한, 교통량을 차량 주행 시 발생하는 COD의 양(COD_{Traffic}; g/day)으로 환산하여 COD_{Traffic}의 필요 저감량도 함께 제시하였다.

교통량과 SSSDL/PRL를 독립변수로 두고, 해역의 COD 농도를 종속변수로 하여 선형 회귀 분석을 수행하면 아래와 같이 회귀식이 결정된다.

$$COD = \alpha \cdot Traffic + \beta \cdot SSSDL/PRL + C \quad (1)$$

여기서, Traffic은 교통량(대/day)을 의미하며, α 와 β 는 각각 교통량과 SSSDL/PRL의 회귀 계수, C는 상수항을 나타낸다. COD 농도 저감을 위한 교통량과 SSSDL/PRL의 필요 저감량은 각각 회귀 계수 α 와 β 의 역수에 비례한다. 예를 들어, 0.1 mg/L의 COD 농도

저감을 위한 교통량의 필요 저감량은 $0.1/\alpha$ 이다.

교통량은 차량 1대당 주행거리를 곱하여 주행거리(대·km/day)로 환산될 수 있으며, 주행거리는 다시 COD 발생량(g)으로 환산될 수 있다. 2002~2022년 기간 동안 하루 평균 차량 1대당 주행거리는 84.6 km이며(Ministry of Land, Infrastructure and Transport[2024a]), 차량 1대가 1 km 주행할 때 발생하는 COD의 양은 약 3.61×10^2 g 대⁻¹ km⁻¹이다(Buzas and Lomlyody[1997]). 교통량(대/day)은 다음 식을 바탕으로 COD_{Traffic}(g/day)로 환산될 수 있다.

$$COD_{Traffic}(g/day) = Traffic (vehicle/day) \times 84.6(km) \times 3.61 \times 10^2 (g/vehicle \cdot km) \quad (2)$$

모델 신뢰성 평가는 회귀 분석에서 모델이 데이터를 정확히 설명하고 예측할 수 있는지를 검증하여, 분석 결과의 타당성과 해석의 정확성을 보장하기 위해 필수적이다. 본 연구에서는 COD 농도 저감을 위한 교통량과 SSSDL/PRL의 필요 저감량을 계산하기 위해 COD 선형 회귀 모델이 사용되었기 때문에, 그 모델의 신뢰성은 더욱 보수적으로 평가되어야 한다. 따라서, 해

역별 COD 선형 회귀 모델은 다음 세 가지 조건을 모두 만족하는 경우에만 신뢰성을 보증할 수 있다고 결정하였다.

1) 독립변수와 종속변수 간의 상관계수 유의성($P > 0.05$ 이면 모델의 신뢰성이 없다고 판단)

2) 다중공선성 존재 여부($VIF > 10$ 이면 모델의 신뢰성이 없다고 판단)

3) 모델의 결정계수($R^2 < 0.5$ 이면 모델의 신뢰성이 없다고 판단)

첫 번째는 독립변수와 종속변수 간의 상관성이다. 두 변수 간 상관계수는 한 변수가 다른 변수를 선형적으로 얼마나 설명 가능한가를 나타낸다. 만약 상관성이 약하다면 그 독립변수로는 COD 농도를 설명할 수 없다. 따라서, 모델의 독립변수와 종속변수 간의 상관계수가 유의하지 않으면($P > 0.05$), 그 모델은 신뢰할 수 없다고 판단하였다(Montgomery[2012]). 두 번째는 다중공선성의 존재 여부다. 다중공선성은 독립변수들 간의 상관성을 나타내며, 다중공선성이 존재하면 회귀 계수의 불안정성이 증가하고 모델이 실제 관계를 제대로 반영하지 못할 가능성이 높다(O'Brien[2007]). VIF(Variance Inflation Factor) 값이 10보다 클 경우, 해당 회귀 모델의 다중공선성이 심각할 수 있음을 나타낸다(Kutner *et al.*[2005]). 다중공선성이 존재하는 회귀 모델($VIF > 10$)은 신뢰성이 낮다고 판단하였다. 마지막 세 번째는 모델의 결정계수 R^2 값이다. 회귀 분석에 사용된 자료는 2005~2022년 동안의 연간 자료이며, 이 중 2016년의 SSSDL/

PRL 자료는 결측이다. 즉, 회귀 분석에 사용된 자료 수는 17개로 적다. 회귀 분석에 사용된 자료 수가 적을수록 통계적 검정의 신뢰성은 낮아지고, 모델이 우연에 의한 패턴을 과대 해석할 가능성이 크다. 따라서, 자료 수가 적을수록 모델의 신뢰성 평가를 더욱 보수적으로 접근할 필요가 있다. 본 연구에서는 회귀 모델의 결정계수 R^2 값이 0.5보다 작다면, 그 모델은 신뢰할 수 없다고 판단하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 환경관리해역 COD 농도 추세 변화

환경관리해역의 1997~2023년 분기별(2, 5, 8, 11월) 해수 표층과 저층 COD 농도의 시계열 변화를 각각 Fig. 2와 3에 나타내었으며, 2011~2023년 2월 퇴적물 COD 농도의 시계열 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 환경관리해역의 해수 COD 농도는 전반기(~2009)에 감소 추세를 보이다가 2010년 이후 후반기에는 증가 추세로 전환되었으며, 퇴적물 COD 농도는 모든 해역에서 증가 추세를 보였다.

3.1.1 해수 표층 COD 농도 추세 변화

시화호-인천 연안을 제외한 모든 환경관리해역의 표층 COD 농도는 전반기에는 감소 추세를 보였으나, 2010년 이후 후반기

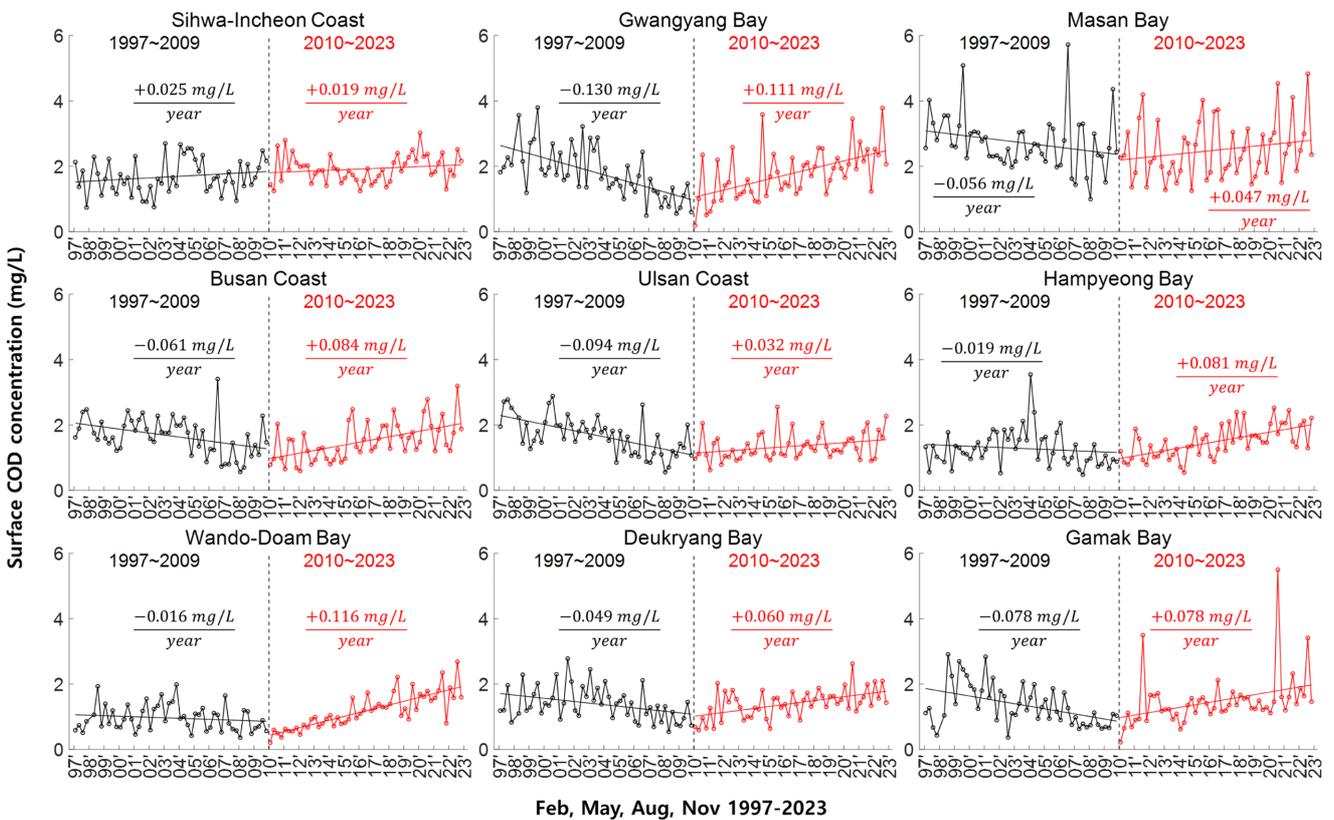


Fig. 2. Quarterly (February, May, August, November) time series of surface COD concentrations in Environmental Management Areas from 1997 to 2023.

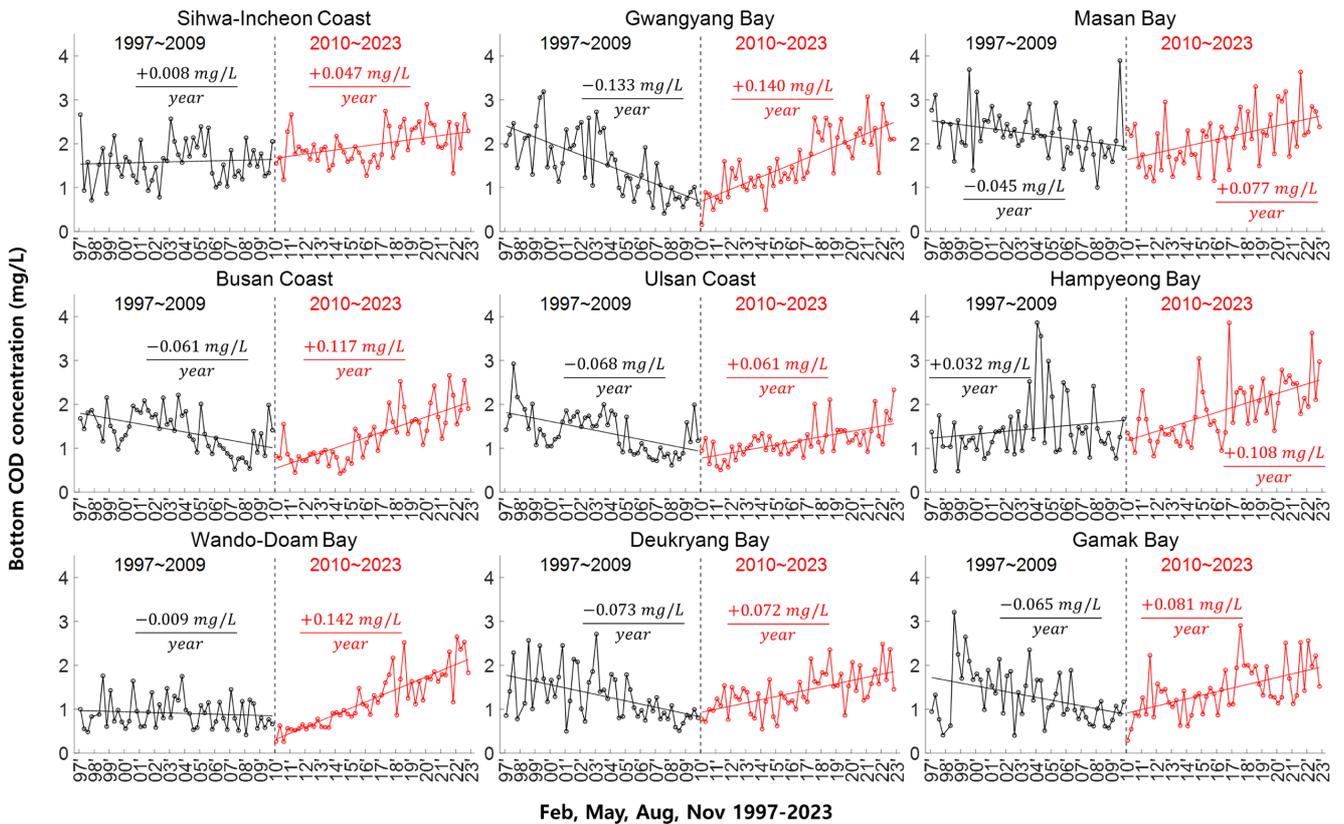


Fig. 3. Quarterly (February, May, August, November) time series of bottom COD concentrations in Environmental Management Areas from 1997 to 2023.

에는 증가 추세로 전환되었다(Fig. 2). 표층 COD 농도의 추세 변화(전반기→후반기)는 환경관리해역별로 광양만(-0.130 → +0.111 mg/L/year), 마산만(-0.056 → +0.047 mg/L/year), 부산 연안(-0.061 → +0.084 mg/L/year), 울산 연안(-0.094 → +0.032 mg/L/year), 함평만(-0.019 → +0.081 mg/L/year), 완도-도암만(-0.016 → +0.116 mg/L/year), 득량만(-0.049 → +0.060 mg/L/year), 가막만(-0.078 → +0.078 mg/L/year)으로 나타났다.

3.1.2 해수 저층 COD 농도 추세 변화

저층 COD 농도는 모든 해역에서 후반기에 증가 추세가 강해지는 결과를 보였다(Fig. 3). 시화호-인천 연안과 함평만의 저층 COD 농도는 전반기와 후반기 모두에서 증가 추세를 보였으며, 후반기에는 그 증가 추세가 더욱 강해졌다. 그 외 해역은 전반기 감소 추세에서 후반기 증가 추세로 전환되었다. 저층 COD 농도의 추세 변화(전반기→후반기)는 환경관리해역별로 시화호-인천 연안(+0.008 → +0.047 mg/L/year), 광양만(-0.133 → +0.140 mg/L/year), 마산만(-0.045 → +0.077 mg/L/year), 부산 연안(-0.061 → +0.117 mg/L/year), 울산 연안(-0.068 → +0.061 mg/L/year), 함평만(+0.032 → +0.108 mg/L/year), 완도-도암만(-0.009 → +0.142 mg/L/year), 득량만(-0.073 → +0.072 mg/L/year), 가막만(-0.065 → +0.081 mg/L/year)으로 나타났다.

서쪽에 위치한 해역일수록 전반기의 COD 농도 추세가 높게 나타났다. 서해 북부에 위치한 시화호-인천 연안의 전반기 표층 COD 농도 추세는 +0.025 mg/L/year로 유일하게 증가 추세를 보였으며, 서해 남부에 위치한 함평만과 남해에서 가장 서쪽에 위치한 완도-도암만은 각각 -0.019, -0.016 mg/L/year로 다른 해역에 비해 상대적으로 완만한 추세를 보였다. 전반기 저층 COD 농도의 경우, 시화호-인천 연안과 함평만이 유일하게 증가 추세를 보였으며, 완도-도암만은 가장 완만한 추세를 보였다.

3.1.3 퇴적물 COD 농도 추세 변화

퇴적물 COD 농도의 경우, 조사기간 동안 9개 해역에서 모두 증가 추세를 보였다(Fig. 4). 퇴적물 COD 농도의 추세는 해역별로 시화호-인천 연안(+0.387 mg/g·dry/year), 광양만(+0.557 mg/g·dry/year), 마산만(+1.403 mg/g·dry/year), 부산 연안(+0.372 mg/g·dry/year), 울산 연안(+0.345 mg/g·dry/year), 함평만(+0.827 mg/g·dry/year), 완도-도암만(+0.273 mg/g·dry/year), 득량만(+0.167 mg/g·dry/year), 가막만(+0.210 mg/g·dry/year)으로 나타났다.

2010년 이후 모든 환경관리해역에서 해수와 퇴적물 COD 농도가 증가하고 있으며, 그 원인은 아직 파악되지 않았다. 연안 오염총량관리제도가 도입된 시화호-인천 연안, 마산만, 부산

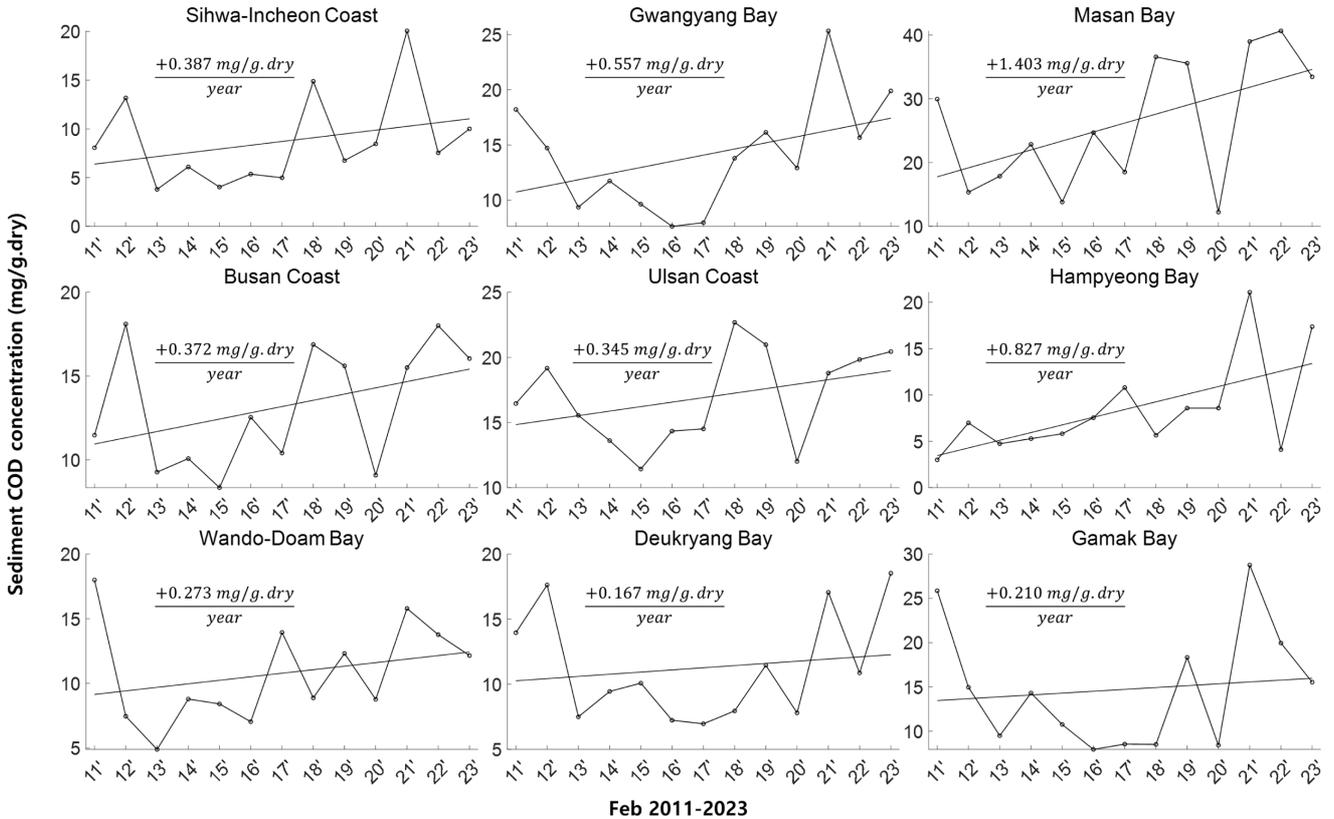


Fig. 4. Time series of sediment COD concentrations in February 2011~2023 in Environmental Management Areas.

연안, 그리고 울산 연안에서도 COD 농도가 증가하고 있는 점을 고려할 때, 그 원인은 연안오염총량관리제도의 관리 범위 밖에 있는 것으로 판단된다.

3.2 환경관리해역 시·도별 도로유출수 관련 지표 변화

환경관리해역 COD 농도 증가의 원인으로 도로유출수의 유입이 고려될 수 있다. 하지만, 도로유출수 통계 자료는 존재하지 않으며, 따라서 본 연구에서는 도로유출수 관련 지표(강수량, 교통량, 하수도)를 사용하여 환경관리해역의 COD 농도에 미치는 도로유출수의 영향을 간접적으로 평가하였다. 환경관리해역이 위치한 경기-인천, 전남, 경남, 울산 지역의 1997~2023 연도별 강수량, 포장도로 연장, 교통량, 하수처리장 방류량 그리고 2005~2022 연도별 합류식과 분류식 하수도 측구 연장의 시계열 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 2010년 이후 후반기의 합류식 하수도 측구는 급격히 감소한 반면, 분류식 하수도 측구는 급격히 증가하였다. 그 결과, 하수처리장을 거치지 않고 바다로 방류되는 도로유출수가 증가했을 것으로 판단된다. 또한, 교통량의 증가로 인해 도로유출수 내 COD 농도가 증가했을 것으로 추정된다.

3.2.1 경기-인천 도로유출수 관련 지표 변화

경기-인천 지역의 연 강수량은 전반기(~2009)와 후반기

(2010~2022) 모두에서 감소 추세를 보였으며, 포장도로 연장과 교통량은 증가 추세를 나타냈다. 합류식 하수도 측구 연장은 전반기에는 $+5.7 \times 10^4$ m/year의 증가 추세를 보였으나, 후반기에는 -2.8×10^4 m/year로 감소 추세로 전환되었다. 그 결과, 합류식 하수도 측구 연장은 2005년 70.7×10^4 m에서 2022년 33.3×10^4 m로 절반 이상 감소하였다. 하수처리장 방류량은 전반기에 $+21.2 \times 10^4$ m³/day/year의 증가 추세를 보였으나, 후반기에는 합류식 하수도의 감소로 인해 하수처리장을 거치는 우수가 감소함에 따라 그 증가 추세가 $+4.4 \times 10^4$ m³/day/year로 둔화되었다. 반면, 분류식 하수도 측구 연장은 후반기에 $+2.1 \times 10^4$ m/year의 증가 추세를 보였으며, 그 결과 2005년 17.0×10^4 m에서 2022년 51.0×10^4 m로 3배 증가하였다. 경기-인천 지역의 합류식 하수도는 감소하고 분류식 하수도는 증가함에 따라 처리되지 않은 도로유출수가 시화호-인천 연안으로 유입되는 양이 증가했을 것으로 판단된다.

3.2.2 전남 도로유출수 관련 지표 변화

전남 지역의 연 강수량은 전반기와 후반기 모두에서 감소 추세를 보였으며, 포장도로 연장과 교통량은 증가 추세를 나타냈다. 교통량의 증가 추세는 전반기 $+16.9$ 대/day/year에서 후반기에는 $+126.3$ 대/day/year로 급격히 증가하였다. 전남 지역의 하수도 측구 연장과 하수처리장 방류량 변화는 경기-인천 지

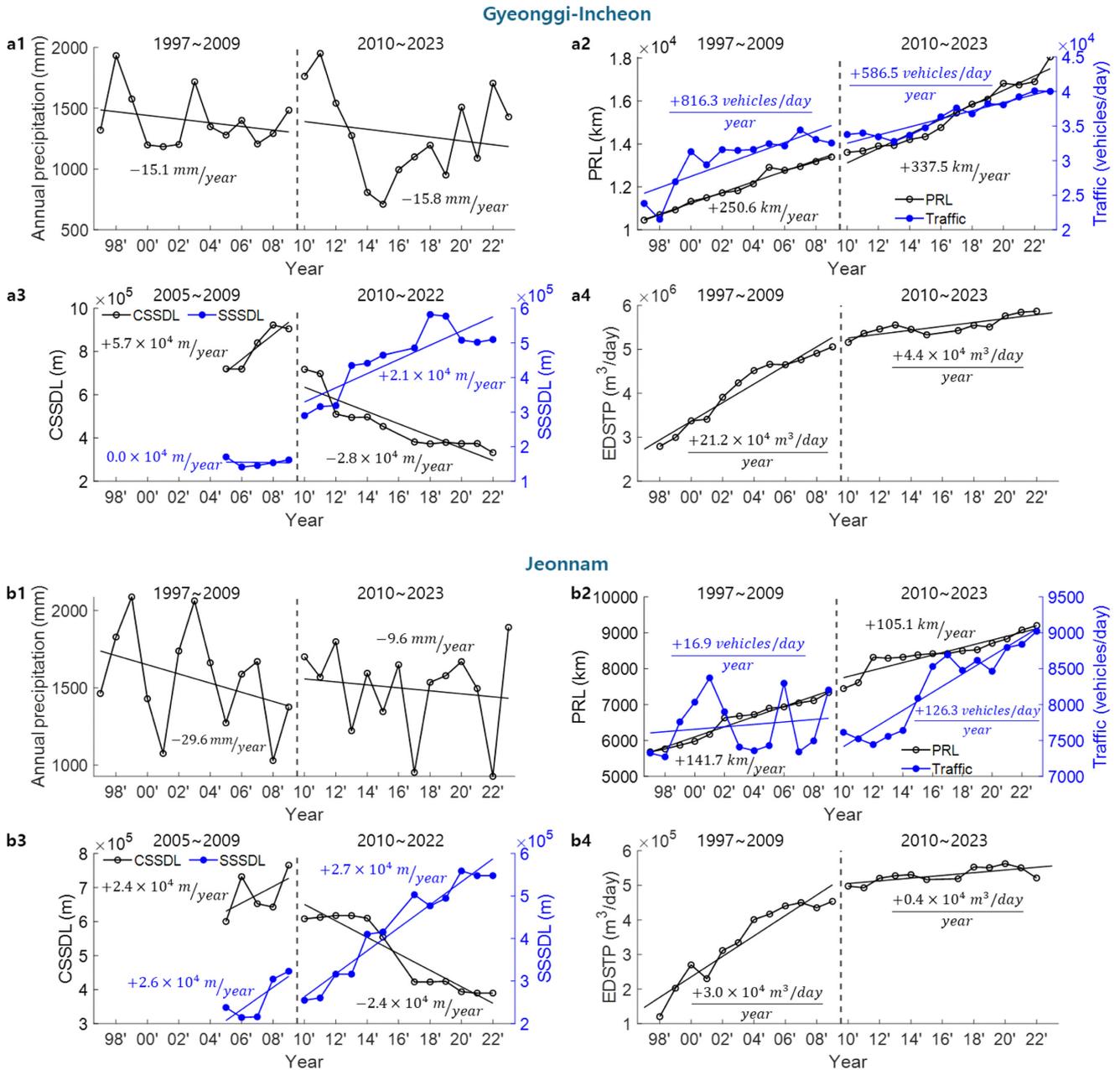


Fig. 5. From 1997 to 2023, **a1** shows annual precipitation, **a2** shows paved road length (PRL; left y-axis) and traffic (right y-axis), **a3** shows combined sewer side drain length (CSSDL; left y-axis) and separate sewer side drain length (SSSDL; right y-axis), and **a4** shows effluent discharge from sewage treatment plant (EDSTP) in the Gyeonggi-Incheon region. Panels **b-d** follow the same structure as **a**, but for different regions: **b**: Jeonnam, **c**: Gyeongnam, **d**: Ulsan. The data trends for the first half (1997~2009) and second half (2010~2023) are indicated on the graphs.

역과 유사한 경향을 보였다. 전남 지역의 합류식 하수도 측구 연장은 전반기 증가 추세(+2.4×10⁴ m³/year)에서 후반기 감소 추세(-2.4×10⁴ m³/year)로 전환되었으며, 그 결과 2005년 60.0×10⁴ m에서 2022년 39.0×10⁴ m로 35.0% 감소하였다. 후반기 합류식 하수도의 감소로 인해 하수처리장을 거치는 우수가 감소함에 따라 하수처리장 방류량의 증가 추세가 둔화되었다. 조사기간 동안 분류식 하수도 측구 연장은 가파른 증가 추세를

보였으며, 2005년 23.8×10⁴ m에서 2022년 54.8×10⁴ m로 약 2.3배 증가하였다. 전남 지역의 합류식 하수도는 감소하고 분류식 하수도가 증가함에 따라 처리되지 않은 도로유출수가 광양만, 함평만, 완도-도암만, 득량만, 그리고 가막만으로 유입되는 양이 증가했을 것으로 판단되며, 또한 교통량의 증가로 인해 도로유출수 내 COD 농도도 증가했을 것으로 추정된다.

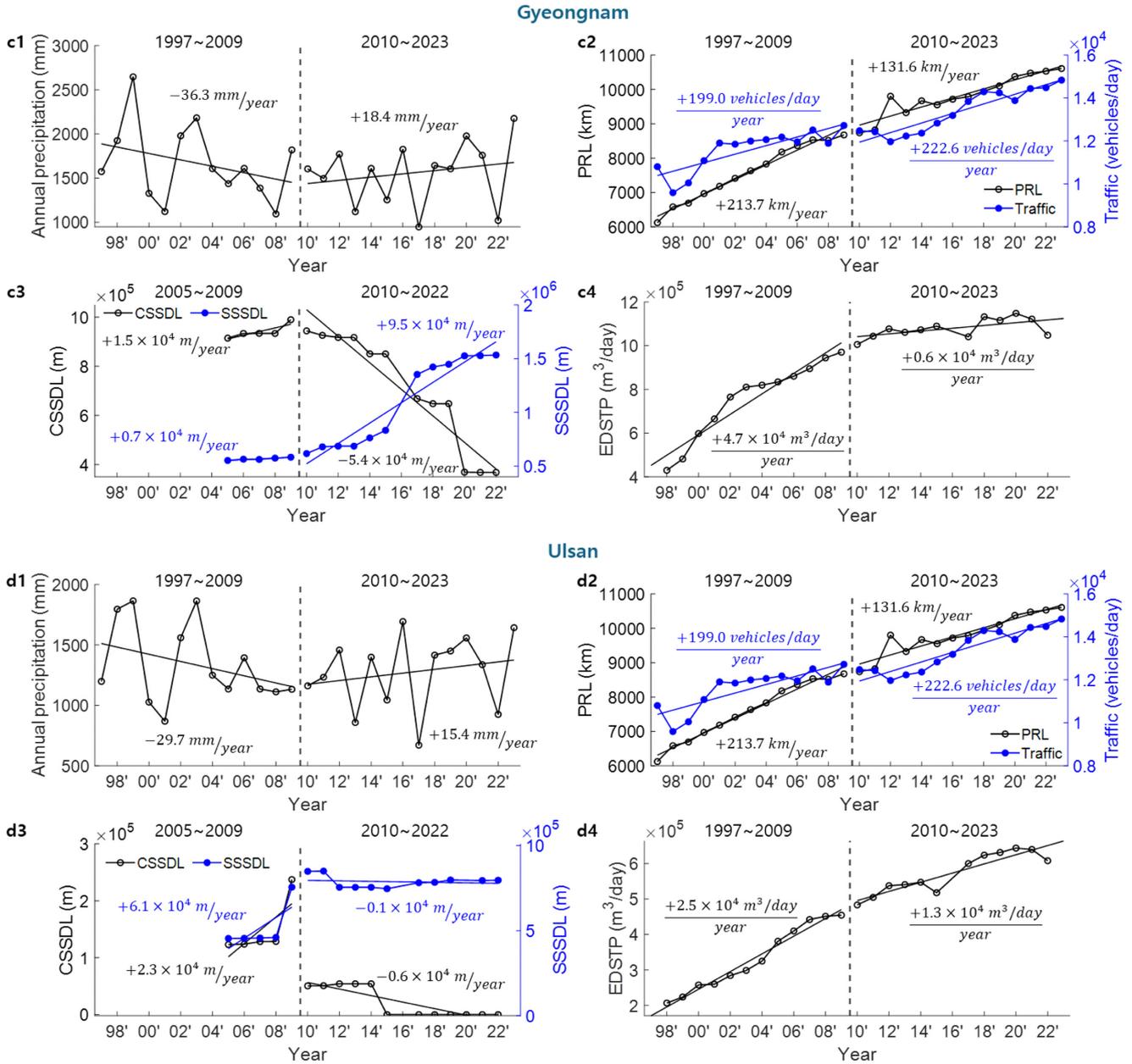


Fig. 5. (continued).

3.2.3 경남 도로유출수 관련 지표 변화

경남 지역의 연 강수량은 전반기에 -36.3 mm/year의 감소 추세를 보였으나, 후반기에는 +18.4 mm/day로 증가 추세로 전환되었다. 조사 기간 동안 포장도로 연장과 교통량은 증가 추세를 보였다. 경남 지역의 하수도 측구 연장과 하수처리장 방류량 변화는 경기-인천 및 전남 지역과 유사한 경향을 보였다. 경남 지역의 합류식 하수도 측구 연장은 전반기 증가 추세(+1.5×10⁴ m³/year)에서 후반기 감소 추세(-5.4×10⁴ m³/year)로 전환되었으며, 그 결과 2005년 91.1×10⁴ m에서 2022년 36.8×10⁴ m로 59.6% 감소하였다. 후반기 합류식 하수도의 감소로 인해 하수

처리장을 거치는 우수가 감소함에 따라 하수처리장 방류량의 증가 추세가 둔화되었다. 분류식 하수도 측구 연장은 조사 기간 동안 증가 추세를 보였으며, 전반기 +0.7×10⁴ m³/year에서 후반기 +9.5×10⁴ m³/year로 그 증가 추세가 강해졌다. 그 결과, 분류식 하수도 측구 연장은 2005년 55.4×10⁴ m에서 2022년 153.4×10⁴ m로 2.8배 증가하였다. 후반기 경남 지역의 합류식 하수도는 감소하고 분류식 하수도와 강수량이 증가함에 따라 처리되지 않은 도로유출수가 마산만과 부산 연안으로 유입되는 양이 증가했을 것으로 판단된다.

3.2.4 울산 도로유출수 관련 지표 변화

울산 지역의 교통량 자료는 별도로 제공되지 않아, 울산 지역의 교통량과 포장도로 연장 자료는 경남 지역의 자료를 사용하였다. 울산 지역의 연 강수량은 전반기에 -29.7 mm/year의 감소 추세를 보였으나, 후반기에는 +15.4 mm/day로 증가 추세로 전환되었다. 조사 기간 동안 포장도로 연장과 교통량은 증가 추세를 보였다. 전반기에 다른 지역에서는 합류식 하수도 측구 연장이 분류식 하수도에 비해 많이 설치된 반면, 울산 지역은 과거부터 합류식 하수도에 비해 분류식 하수도가 더 많이 설치된 특징을 보인다. 이는 울산이 중공업과 석유화학 산업이 발달한 산업 도시로서, 오수와 우수를 분리하여 처리할 필요성이 컸기 때문이다(Jung[2007]). 이러한 산업적 특성과 함께, 도시화 과정에서 환경 보호 요구가 분류식 하수도 시스템의 확산을 촉진한 것으로 판단된다. 또한, 울산시는 2006년과 2008년 총 1,810억 원의 사업비를 들여 하수관로 분류식화 사업을 추진하였다. 그 결과, 2009년 분류식 하수도 측구 연장은 75.6×10^4 m로 전년도 대비 1.6배 증가한 반면, 2010년 합류식 하수도 측구 연장은 5.1×10^4 m로 전년도 대비 78.5% 감소하였다. 더욱이, 울산시는 2015년 말 기준으로 하수도 측구의 분류식화를 100% 완료하였다. 그 결과, 2015년 8월 울산 연안의 표층 COD 농도는 2.6 mg/L로 2014년 8월 대비 0.8 mg/L 증가하였으며, 2017년과 2018년 8월의 저층 COD 농도는 각각 2.0, 2.1 mg/L로 2014년 8월 대비 각각 0.7, 0.8 mg/L 증가하였다. 또한, 2018년 2월 퇴적물 COD 농도는 22.7 mg/g.dry로 조사 기간 중 최고치를 기록하였다. 울산 지역의 합류식 하수도는 감소하고 분류식 하수도와 강수량이 증가함에 따라 처리되지 않은 도로유출수가 울산 연안으로 유입되는 양이 증가했을 것으로 판단된다.

3.3 환경관리해역 COD 농도와 도로유출수 관련 지표 간 상관성

환경관리해역별 2005~2022년 기간 동안의 연평균 표·저층 COD 농도와 1) 연 강수량, 2) 교통량, 3) 포장도로 연장 대비 분류식 하수도 측구 연장(SSSDL/PRL; m/km) 간의 1:1 산점도와 상관계수를 Fig. 6에 나타내었다. 여기서, 강수량, 교통량, 그리고 SSSDL/PRL 자료는 환경관리해역이 위치한 시도별 자료를 사용하였다. 예를 들어, 함평만, 완도-도암만, 득량만, 가막만, 광양만은 전남에 위치해 있으므로, 이들 해역의 COD 농도는 전남 자료와의 상관성을 계산하여 나타내었다.

3.3.1 COD 농도와 강수량 간 상관성

모든 해역에서 표·저층 COD 농도는 연 강수량과 유의한 상관성을 보이지 않았다($P > 0.05$). 이는 자료 간 관측 시점이 달라 해역 COD 농도에 미치는 강수량의 영향이 희석된 것으로 판단된다. 해역의 COD 농도는 분기별 특정 시점에서 관측된 반면, 연 강수량 자료는 매일 관측된 강수량의 연간 누적값이다. 2022년 기준으로 전국 평균 월별 강수량의 최댓값과 최솟값은 약 120배 차이가 나는 등, 계절별로 경향이 크게 달라지며, 같은

계절이라도 관측 일자에 따라 유의한 차이를 보일 수 있다. 따라서 해역 COD 농도와 강수량 간의 상관성을 정확하게 평가하기 위해서는 COD 농도의 관측 일자를 알고, 그 관측 일자로부터 수일간 누적된 강수량 자료가 필요하다. 그러나 해양환경 측정망의 2010년 이전 자료에서는 관측 일자가 제공되지 않아, 본 연구에서는 강수량과 해역 COD 농도 간의 정확한 상관관계를 규명하는 데 어려움이 있다. 다만, 2011년 이후 해양환경 측정망 자료에서는 관측 일자가 제공되기 때문에, 향후 자료가 축적되면서 이 문제는 해결될 것으로 사료된다.

3.3.2 COD 농도와 교통량 및 SSSDL/PRL 간의 상관성

강수량과 달리 포장도로 연장과 분류식 하수도 측구 연장은 시설물이기 때문에 계절 영향을 받지 않는다. 또한, 연도별 일평균 교통량은 2022년 기준으로 월별 최댓값과 최솟값의 차이가 16.1%로, 강수량에 비해 계절의 영향을 상대적으로 적게 받는다. 이러한 이유로 연간 자료를 사용했음에도 불구하고, 교통량과 SSSDL/PRL은 해역 COD 농도와 유의한 양의 상관성을 보였다. 시화호-인천 연안과 마산만의 표층 COD 농도를 제외하고 모든 해역의 표·저층 COD 농도는 교통량과 유의한 양의 상관성을 보였다($P < 0.05$). 해역별로 그 상관계수(표층 / 저층)는 각각 시화호-인천 연안(0.35 / 0.69), 광양만(0.73 / 0.83), 마산만(0.23 / 0.72), 부산 연안(0.71 / 0.87), 울산 연안(0.54 / 0.75), 함평만(0.76 / 0.77), 완도-도암만(0.80 / 0.80), 득량만(0.57 / 0.68), 가막만(0.54 / 0.74)으로 나타났다.

SSSDL/PRL은 지역별로 설치된 포장도로에 분류식 하수도 측구가 얼마나 설치되었는지를 나타낸다. 시화호-인천 연안과 마산만의 표층 COD 농도와 울산 연안의 표·저층 COD 농도를 제외하고 모든 해역의 표·저층 COD 농도는 SSSDL/PRL과 유의한 양의 상관성을 보였다($P < 0.05$). 해역별로 그 상관계수(표층 / 저층)는 각각 시화호-인천 연안(0.40 / 0.69), 광양만(0.80 / 0.86), 마산만(0.19 / 0.70), 부산 연안(0.73 / 0.86), 울산 연안(0.10 / 0.17), 함평만(0.82 / 0.84), 완도-도암만(0.85 / 0.85), 득량만(0.68 / 0.74), 가막만(0.64 / 0.75)으로 나타났다. 울산 연안은 다른 해역들에 비해 상관성이 상대적으로 약하게 나타났다. 이는 울산 지역의 하수관로 분류식화 사업에 기인한 것으로 판단된다. 다른 지역들은 하수관로의 분류식화가 점진적으로 진행된 반면, 울산 지역은 과거부터 합류식 하수도보다 분류식 하수도가 더 많이 설치되었으며, 2009~2010년 동안 하수관로 분류식화 사업이 급격히 진행되었다. 이러한 이유로 2010년 이후 울산 연안의 COD 농도는 증가 추세를 보였으나, SSSDL/PRL과는 유의한 상관성을 나타내지 않은 것으로 판단된다.

모든 해역에서 도로유출수 관련 지표들은 해역의 COD 농도와 양의 상관성을 보였는데, 특히 저층 COD 농도와의 상관성이 표층에 비해 상대적으로 강하게 나타났다. 이는 도로유출수 내 난분해성 유기물질의 거동 특성에 기인한 것으로 판단된다. COD는 일반적으로 난분해성 유기물질(Refractory Organic Matters)

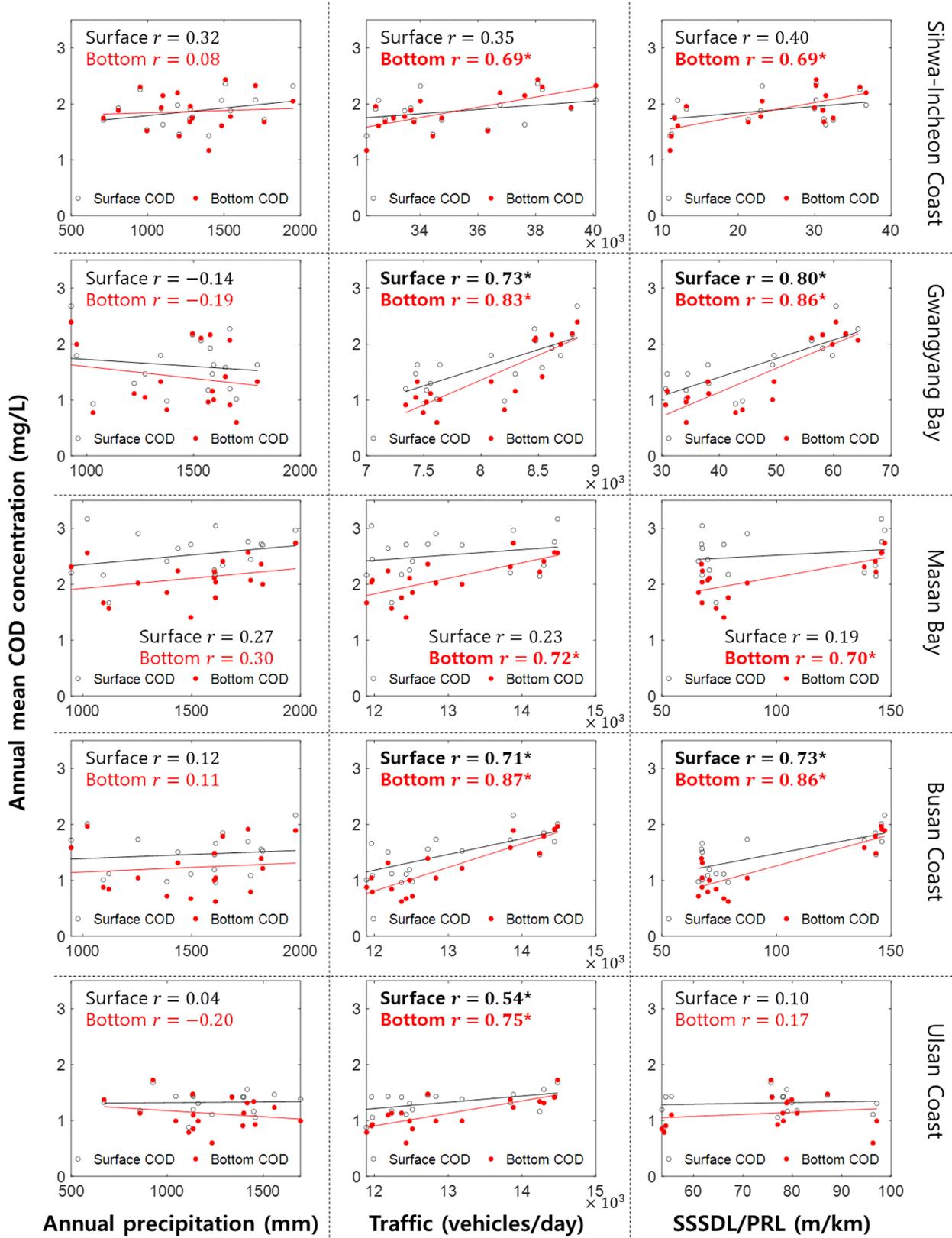


Fig. 6. Scatter plots of annual mean surface and bottom COD concentrations against 1) annual precipitation, 2) traffic, and 3) Ratio of separate sewer side drain length to paved road length (SSSDL/PRL) from 2005 to 2022 in Environmental Management Areas. The correlation coefficients between surface and bottom COD concentrations and each indicator are shown on the graph. * indicates a significant correlation ($P < 0.05$).

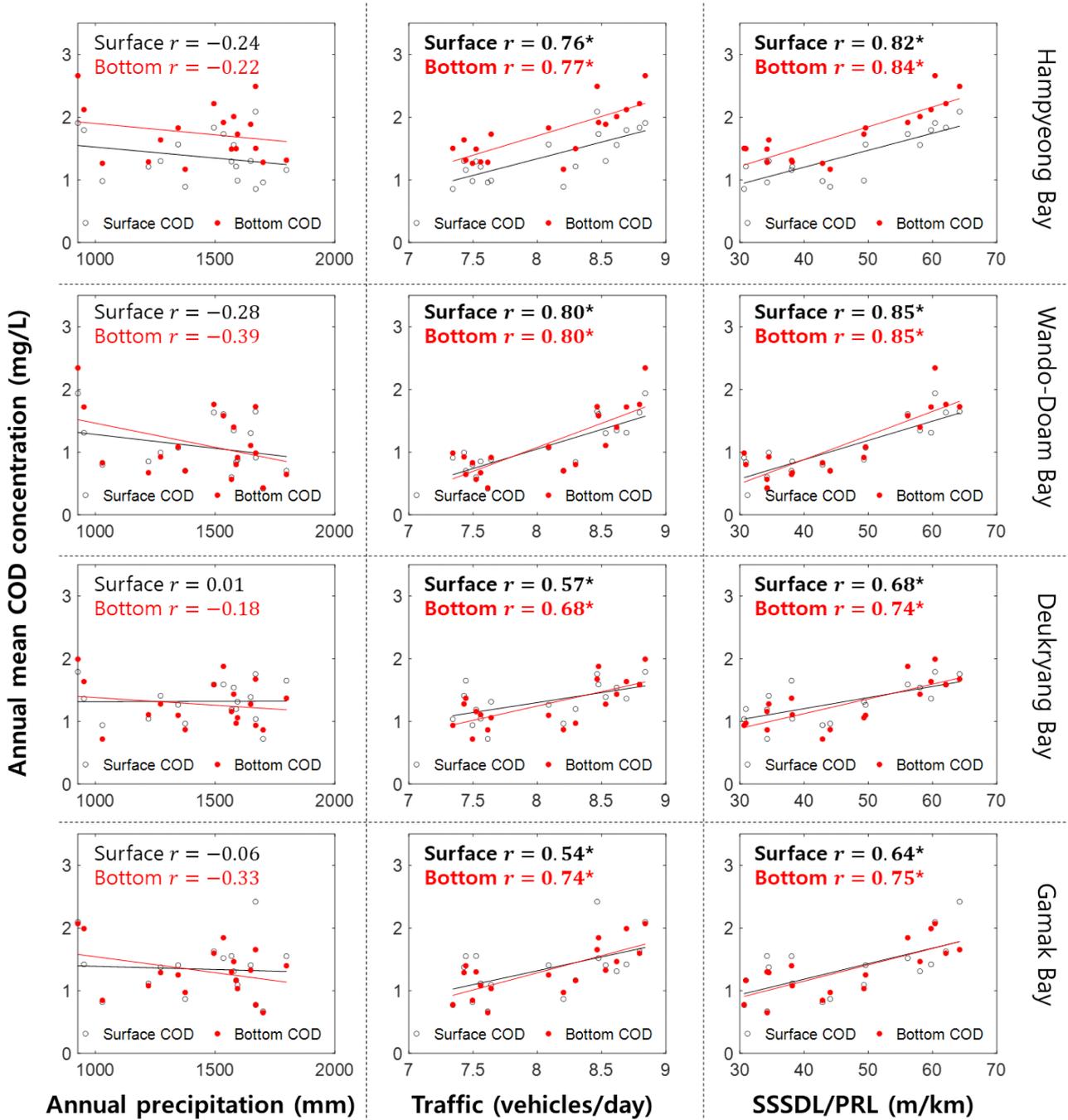


Fig. 6. (continued).

오염도를 나타내는 지표로 사용되며(Sawyer *et al.*[2003]), 도로 유출수 내 SS와 COD 농도 간의 상관계수는 0.87로 유의한 양의 상관성을 보인다(Lee *et al.*[2005]). 또한, 난분해성 유기물질은 생분해성(Biodegradable) 유기물질에 비해 입자 크기가 상대적으로 더 크다(Tchobanoglous *et al.*[2002]). 즉, 도로유출수 내 난분해성 유기물질은 대부분 입자 형태를 띠거나, 입자 형태의 물질에 흡착된 상태로 존재한다고 볼 수 있다. 연안으로 유입

된 입자성 물질은 상대적으로 높은 밀도로 인해 저층으로 침강한다. 이러한 이유로 해역의 저층 COD 농도는 도로유출수 관련 지표와 표층에 비해 상대적으로 강한 상관성을 보인 것으로 판단된다. 또한 같은 이유로 퇴적물 COD 농도가 증가한 것으로 판단된다(Fig. 4). 이 퇴적물 COD 농도의 증가는 유기물질 용출의 증가로 이어져 저층 COD 농도를 높이는 데 기여했을 것으로 추정된다.

3.4 환경관리해역 COD 농도 저감을 위한 도로유출수 관련 지표의 필요 저감량 제시

3.4.1 환경관리해역 COD 농도 회귀 분석

앞선 결과에서 환경관리해역의 연평균 COD 농도는 일부 해역을 제외하고 교통량 및 SSSDL/PRL과 유의한 양의 상관성을 보였다(Fig. 6). 해역별로 교통량과 SSSDL/PRL을 독립변수로 두고, 해역의 COD 농도를 종속변수로 하여 선형 회귀 모델을 구축하였다. 구축된 선형 회귀 모델의 검증을 위해 COD 농도의 관측값과 계산값 간의 1:1 산점도와 결정계수를 Fig. 7에, 그리고 그 회귀식을 Table 1에 나타내었다. 시화호-인천 연안, 득량만, 그리고 가막만 저층 COD 회귀 모델과 광양만, 함평만, 완도-도암만의 표·저층 COD 회귀 모델이 모든 신뢰성 조건을 만족하였으며, 그 외 모델들은 신뢰성 조건을 만족하지 못하였다.

3.4.2 회귀 모델 신뢰성 평가

모델 신뢰성 평가는 회귀 분석에서 모델이 데이터를 정확히 설명하고 예측할 수 있는지를 검증하여, 분석 결과의 타당성과 해석의 정확성을 보장하기 위해 필수적이다. 마산만 표층 COD 농도의 회귀 모델에서 결정계수는 0.06으로 매우 낮게 나타났다. 또한, 독립변수 중 SSSDL/PRL의 회귀 계수가 음수로 나타나, SSSDL/PRL가 증가할수록 해역의 COD 농도도 증가할 것이라는 앞선 고찰과 상반되는 결과를 보였다. 이는 독립변수와 종속변수 간의 약한 상관성에 기인한 것으로, 마산만 표층 COD 농도와 SSSDL/PRL 간의 상관계수는 0.19로 상관성은 약했으며, 유의성도 없었다($P > 0.05$). 즉, 경남 지역의 SSSDL/PRL 자료로는 마산만 표층 COD 농도를 설명할 수 없으며, 해당 회귀 모델의 신뢰성도 낮다. 같은 이유로 독립변수와 종속변수 간의 상관성이 낮아 해역의 COD 농도를 설명할 수 없는 시화호-인

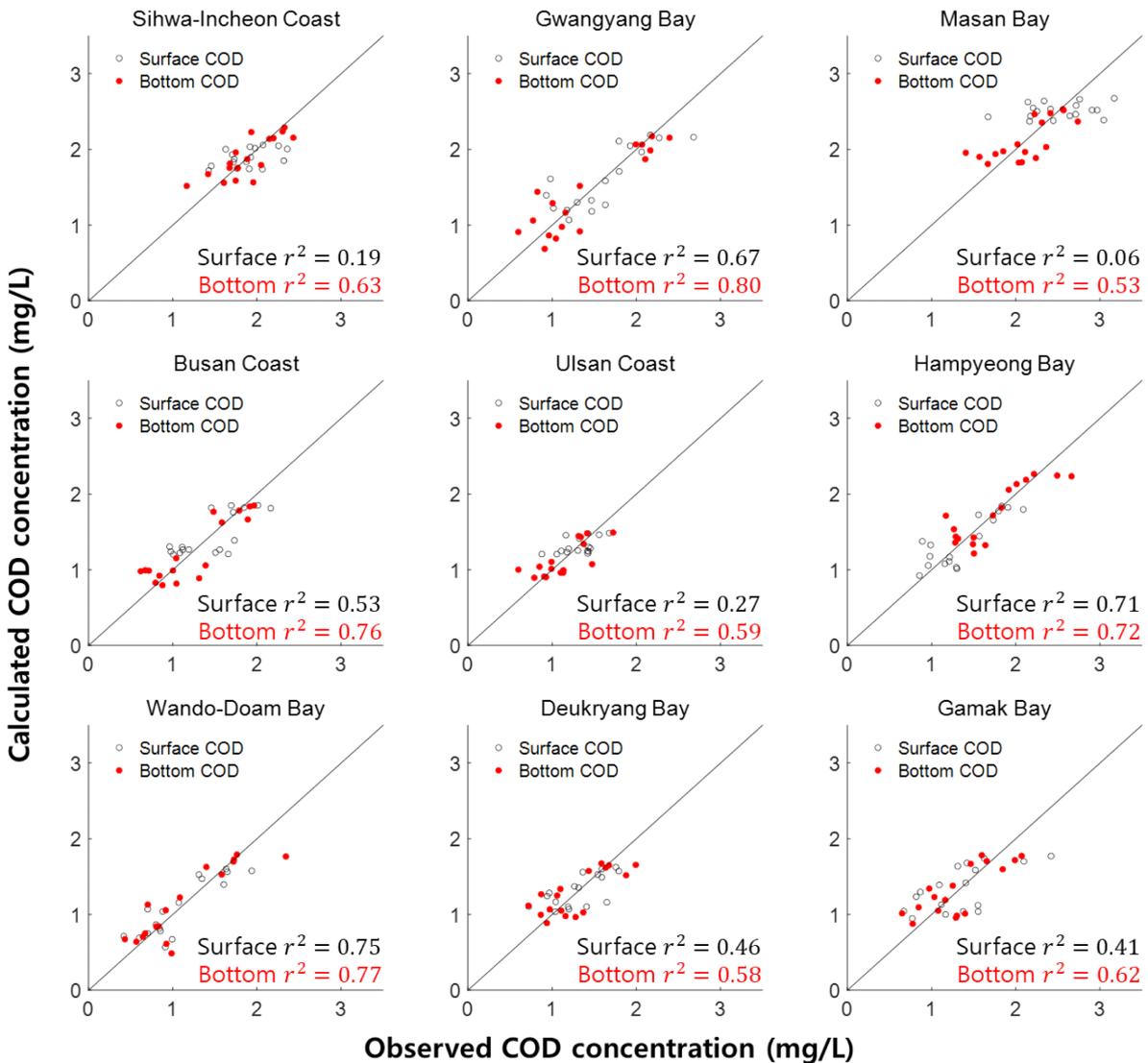


Fig. 7. Scatter plot between observed and calculated COD concentrations in Environmental Management Areas. The R^2 value of the regression models is shown on the graph.

Table 1. Linear regression equations for predicting COD concentration using traffic and SSSDL/PRL* as independent variables by Environmental Management Area

Region	Regression equation		R ²	Model Reliability**
	$x_1 = \text{Traffic (vehicles/day)}, x_2 = \text{SSSDL/PRL}^* \text{ (m/km)}$			
Sihwa-Incheon Coast	Surface COD = $0.263 \times 10^{-4}x_1 + 6.757 \times 10^{-3}x_2 + 0.799$		0.19	A, C reliable
	Bottom COD = $0.668 \times 10^{-4}x_1 + 12.574 \times 10^{-3}x_2 - 0.768$		0.63	
Gwangyang Bay	Surface COD = $2.659 \times 10^{-4}x_1 + 23.442 \times 10^{-3}x_2 - 1.603$		0.67	reliable reliable
	Bottom COD = $4.942 \times 10^{-4}x_1 + 24.496 \times 10^{-3}x_2 - 3.693$		0.80	
Masan Bay	Surface COD = $2.498 \times 10^{-4}x_1 - 4.384 \times 10^{-3}x_2 - 0.304$		0.06	A, B, C B
	Bottom COD = $2.696 \times 10^{-4}x_1 - 0.307 \times 10^{-3}x_2 - 1.419$		0.53	
Busan Coast	Surface COD = $0.769 \times 10^{-4}x_1 + 5.745 \times 10^{-3}x_2 - 0.099$		0.53	B B
	Bottom COD = $3.155 \times 10^{-4}x_1 - 3.019 \times 10^{-3}x_2 - 3.159$		0.76	
Ulsan Coast	Surface COD = $1.107 \times 10^{-4}x_1 - 0.451 \times 10^{-3}x_2 - 0.083$		0.27	A, C A
	Bottom COD = $2.345 \times 10^{-4}x_1 - 0.452 \times 10^{-3}x_2 - 1.870$		0.59	
Hampyeong Bay	Surface COD = $2.502 \times 10^{-4}x_1 + 17.647 \times 10^{-3}x_2 - 1.453$		0.71	reliable reliable
	Bottom COD = $2.139 \times 10^{-4}x_1 - 23.514 \times 10^{-3}x_2 - 1.076$		0.72	
Wando-Doam Bay	Surface COD = $2.532 \times 10^{-4}x_1 + 21.185 \times 10^{-3}x_2 - 1.940$		0.75	reliable reliable
	Bottom COD = $3.632 \times 10^{-4}x_1 - 24.779 \times 10^{-3}x_2 - 2.941$		0.77	
Deukryang Bay	Surface COD = $0.305 \times 10^{-4}x_1 + 16.536 \times 10^{-3}x_2 + 0.305$		0.46	C reliable
	Bottom COD = $1.848 \times 10^{-4}x_1 - 16.550 \times 10^{-3}x_2 - 0.978$		0.58	
Gamak Bay	Surface COD = $0.487 \times 10^{-4}x_1 + 22.936 \times 10^{-3}x_2 - 0.113$		0.41	C reliable
	Bottom COD = $3.259 \times 10^{-4}x_1 - 13.787 \times 10^{-3}x_2 - 1.939$		0.62	

*SSSDL: Separate sewer side drain length(m), PRL: Paved road length(km).

**A, B, C indicate that the model is unreliable. A: low correlation between independent and dependent variables, B: presence of multicollinearity (VIF>10), C: R² of Model < 0.5.

천 연안 표층 COD와 울산 연안 표·저층 COD의 회귀 모델도 신뢰성이 낮을 것으로 판단된다. 이 외에도 VIF 값이 10보다 크게 나타나 다중공선성 조건을 만족하지 못한 마산만과 부산 연안의 COD 회귀 모델과 R² 값이 0.5보다 작게 나타난 시화호-인천 연안, 마산만, 울산 연안, 득량만, 그리고 가막만의 표층 COD 회귀 모델은 신뢰할 수 없다고 판단하였다. 신뢰성이 낮은 상기 모델들은 COD 농도 저감을 위한 도로유출수 관련 지표의 필요 저감량을 제시하지 않았다.

3.4.3 COD 농도 저감을 위한 도로유출수 관련 지표의 필요 저감량 제시

모델의 신뢰성이 낮게 나타난 해역들을 제외하고, 해역별

COD 회귀식을 사용하여 0.1 mg/L의 COD 농도 저감을 위해 필요한 도로유출수 관련 지표의 필요 저감량을 Table 2에 제시하였다. 도로유출수 관련 지표 중 교통량은 차량 사용과 이동에 대한 개인의 선택으로 결정되는 지표로 인위적으로 제어하는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 교통량의 필요 저감량은 인위적으로 제어 가능한 다른 지표로 환산될 필요가 있다. 교통량은 차량 1대당 주행거리를 곱하여 주행거리(대·km/day)로 환산될 수 있으며, 주행거리는 다시 COD 발생량(g)으로 환산될 수 있다. 식 (2)를 사용하여 COD 농도 저감을 위해 필요한 교통량의 필요 저감량을 차량주행 시 발생하는 COD(COD_{Traffic}; g/day)의 필요 저감량으로 환산하여 Table 2에 함께 제시하였다.

해역별 0.1 mg/L의 COD 농도 저감을 위한 도로유출수 관련

Table 2. Required reductions in traffic (vehicles/day), COD_{Traffic}* (g/day), and SSSDL/PRL** (m/km) to achieve a 0.1 mg/L reduction in COD concentration by region

Region	Target	Traffic (vehicles/day)	COD _{Traffic} * (g/day)	SSSDL/PRL** (m/km)
Sihwa-Incheon Coast	Bottom COD	1497.4	4570.8	8.0
	Surface COD	376.1	1148.1	4.3
Gwangyang Bay	Bottom COD	202.3	617.7	4.1
	Surface COD	399.7	1220.2	5.7
Hampyeong Bay	Bottom COD	467.4	1426.8	4.3
	Surface COD	395.0	1205.6	4.7
Wando-Doam Bay	Bottom COD	275.3	840.3	4.0
	Bottom COD	541.2	1651.9	6.0
Gamak Bay	Bottom COD	306.8	936.6	7.3

*COD_{Traffic}: COD emissions from vehicle operation (g/day).

**SSSDL: Separate sewer side drain length(m), PRL: Paved road length(km).

지표의 필요 저감량(교통량(대/day) / $COD_{Traffic}(g/day)$ / $SSSDL/PRL(m/km)$)은 각각 시화호-인천 연안 저층 COD(1497.4 / 4570.8 / 8.0), 광양만 표층 COD(376.1 / 1148.1 / 4.3), 저층 COD(202.3 / 617.7 / 4.1), 함평만 표층 COD(399.7 / 1220.2 / 5.7), 저층 COD(467.4 / 1426.8 / 4.3), 완도-도암만 표층 COD(395.0 / 1205.6 / 4.7), 저층 COD(275.3 / 840.3 / 4.0), 득량만 저층 COD(541.2 / 1651.9 / 6.0), 그리고 가막만 저층 COD(306.8 / 936.6 / 7.3)로 나타났다. 예를 들어, 시화호-인천 연안 저층 COD 농도를 0.1 mg/L 감소시키기 위해서는 경기-인천의 교통량을 1497.4 대/day 줄이거나, $COD_{Traffic}$ 을 4570.8 g/day 감소시키거나, 또는 $SSSDL/PRL$ 비율을 8.0 m/km 줄일 필요가 있다.

향후 연구에서는 도로유출수 관련 지표의 공간적 해상도를 높일 필요가 있다. 본 연구에서는 환경관리해역이 위치한 시·도별 도로유출수 관련 지표를 사용하였다. 그러나 이러한 시·도별 자료는 해당 해역에 미치는 영향을 초과하는 더 광범위한 영역을 포함하고 있어, 결과에 모호성이 발생할 수 있다. 예를 들어, 시화호-인천 연안 저층 COD 농도 저감을 위해 필요한 교통량과 $COD_{Traffic}$ 의 저감량은 다른 해역들에 비해 3~7배 높다. 이는 경기-인천 지역의 교통량이 다른 지역들에 비해 높기 때문이다. 그러나, 시화호-인천 연안 COD 농도를 감소시키기 위해 경기-인천 전체 지역의 교통량을 줄일 필요는 없다. 향후 연구에서는 먼저 해역에 영향을 미칠 수 있는 육지 범위를 특정하고, 그 영향 범위 내의 도로유출수 관련 지표만을 사용하여 COD 농도와의 상관성을 분석할 필요가 있다.

2019년 이후, 환경관리해역들에서는 도로유출수의 연안 유입을 직·간접적으로 저감할 수 있는 비점오염원 저감 사업을 추진하고 있다. 시화호에서는 산업단지 내 초기우수처리시설 설치, 도로오염원 유입 차단, 그리고 우수관로 및 토구 준설 사업을 추진하였으며, 부산 연안에서는 주요 하천을 대상으로 비점오염 저감시설 설치 사업을 추진하고 있다. 광양만, 마산만, 울산 연안, 그리고 가막만에서는 도로 청소를 통한 비점오염원 저감을 추진하였고, 인천 연안과 마산만에서는 우수저류시설 설치 사업을 추진하였다. 그러나, 득량만, 함평만, 그리고 완도-도암만은 도로유출수의 연안 COD 부하량 저감 방안에 대한 추진 계획이 없다. 향후 도로유출수의 연안 COD 부하량 저감 방안이 도입된 해역과 그렇지 않은 해역 간의 COD 농도 개선 정도를 비교하여, 도로유출수가 연안 COD 농도에 미치는 영향을 간접적으로 평가할 수 있을 것으로 예상된다. 상기에서 추진 중인 사업 외에도, 도로유출수의 연안 COD 부하를 저감하는 다른 방안으로 우수관 내의 COD 농도를 저감하는 방법이 있다. 도로유출수 내의 COD 물질은 대부분 입자 형태로 존재하므로, 우수관 내의 부유물질 제거를 통해 COD 물질을 상당량 제거할 수 있을 것으로 기대된다(Lee *et al.*[2005]). 본 연구에서 도출된 $COD_{Traffic}$ 의 필요 저감량을 바탕으로 우수관 내의 COD 농도 필요 저감량을 계획할 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 환경관리해역별 COD 농도와 도로유출수 관련 지표의 시계열 변화를 분석하고, 두 자료 간의 상관성을 계산하였다. 이후, 도로유출수 지표와 해역 COD 농도 간의 회귀 분석을 통해 해역별로 0.1 mg/L의 COD 농도 저감을 위해 필요한 도로유출수 저감량을 제시하였다. 환경관리해역의 표·저층 COD 농도는 1997~2009년 동안 감소 추세를 보이다가, 2010년 이후 증가 추세로 전환되었으며, 2011년 이후 퇴적물 COD 농도 또한 증가 추세를 보였다. 이와 같은 시기에 하수도 시스템의 변화가 유사한 경향을 보였다. 환경관리해역이 위치한 경기-인천, 전남, 경남, 그리고 울산 지역의 하수도 시스템은 과거 합류식 하수도에서 2010년 이후 급격히 분류식 하수도로 전환되었다. 분류식 하수도는 도로유출수와 같은 우수를 하수처리장을 거치지 않고 하천이나 바다로 직접 방류한다. 또한, 조사 기간 동안 증가한 교통량은 도로유출수 내 COD 농도의 증가 요인으로 작용했을 가능성이 있다. 즉, 교통량 증가로 인해 도로유출수 내 COD 농도가 상승하고, 분류식 하수도 도입으로 인해 미처리된 도로유출수가 환경관리해역으로 유입되는 양이 증가했을 것으로 추정된다. 이러한 요인들이 최근 환경관리해역 COD 농도 증가의 원인으로 판단된다. 선형 회귀 분석을 통해 환경관리해역의 COD 농도를 0.1 mg/L 저감하기 위해 필요한 도로유출수 관련 지표 저감량을 제시하였으며, 이는 향후 COD 농도 저감 방안 계획의 기초 자료로 사용될 수 있을 것으로 기대된다. 다만, 본 연구에서 사용된 도로유출수 관련 지표는 시·도별 자료로, 실제 해역에 영향을 미치는 육지 범위를 초과하는 광범위한 영역을 포함하고 있어 결과가 과대평가될 우려가 있다. 따라서, 향후 연구에서는 먼저 해역에 영향을 미치는 육지 범위를 특정하고, 그 영향 범위 내의 도로유출수 관련 지표만을 사용하여 COD 농도와의 상관성을 분석할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 2021학년도 부경대학교 연구년 교원 지원사업과 2024학년도 부경대학교 4단계 BK21 대학원혁신사업 지원으로 이루어졌음.

References

- [1] Brombach, H., Weiss, G., and Fuchs, S., 2005, A new database on urban runoff pollution: comparison of separate and combined sewer systems, *Water Sci. Technol.*, 51(2), 119-128.
- [2] Butler, D. and Davies, J.W., 2010, *Urban Drainage*, 3rd ed., Spon Press, London, UK.
- [3] Buzas, K. and Lomlyody, L., 1997, Impacts of Road Traffic on Water Quality, *Period. Polytech. Civ. Eng.*, 41(2), 95-106.
- [4] Characklis, G.W. and Wiesner, M.R., 1997, *Particles, metals,*

- and water quality in runoff from large urban watershed, *J. Environ. Eng.*, 123(8), 753-759.
- [5] Jung, S.M., 2007, Characteristics of Ulsan Petrochemical Public Corporation Wastewater and Treatment Effect of Physicochemical, M.S. thesis, Dept. Environ. Eng., University of Ulsan, Ulsan, Korea.
- [6] Jun, E.J., Yi, Y.M., Lee, D.I., and Kim, G.Y., 2018, Diagnosis of development projects and water quality changes in the environmental management sea areas and improvement of impact assessment, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf.*, 24(6), 726-734.
- [7] Kutner, M.H., Nachtsheim, C.J., Neter, J., and Li, W., 2005, *Applied Linear Statistical Models*, McGraw-Hill/Irwin, New York, NY, USA.
- [8] Lee, J.H. and Bang, K.W., 2000, Characterization of Urban Stormwater Runoff, *Water Res.*, 34(6), 1773-1780.
- [9] Lee, J.H., Cho, Y.J., and Bang, K.W., 2005, Characteristics and Particle Size Distribution of Road Runoff during Rainfall Events, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 27(7), 777-784.
- [10] Ministry of Environment. 2024, Sewerage Statistics, Ministry of Environment, Sejong, Republic of Korea.
- [11] Ministry of Land, Infrastructure and Transport. 2024a, Annual Report on Road Traffic Volume Statistics, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Sejong, Republic of Korea.
- [12] Ministry of Land, Infrastructure and Transport. 2024b, Road Status Report, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Sejong, Republic of Korea.
- [13] Ministry of Oceans and Fisheries, 2024, Marine Environment Management Act (Act No. 19779), Article 15: Designation and Management of Environmental Management Areas. Republic of Korea. Retrieved from <http://www.law.go.kr/법령/해양환경관리법>.
- [14] Montgomery, D.C., Peck, E.A., and Vining, G.G., 2021, *Introduction to linear regression analysis*, John Wiley & Sons.
- [15] O'Brien, R.M., 2007, A caution regarding rules of thumb for variance inflation factors, *Qual. and Quant.*, 41, 673-690.
- [16] Sawyer, C.N., McCarty, P.L., and Parkin, G.F., 2003, *Chemistry for Environmental Engineering and Science*, 5th ed., McGraw-Hill, New York, NY, USA.
- [17] Tchobanoglous, G., Burton, F.L., and Stensel, H.D., 2002, *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*, 4th ed., McGraw-Hill, New York, NY, USA.
- [18] Walsh, C.J., Booth, D.B., Burns, M.J., Fletcher, T.D., Hale, R.L., Hoang, L.N., and Wallace, A., 2016, Principles for Urban Stormwater Management to Protect Stream Ecosystems, *Freshw. Sci.*, 35(1), 398-411.

Received 11 September 2024

Revised 18 November 2024

Accepted 18 December 2024