

Original Article

## 구리 용출량을 통한 무역항 내 금속 오염 원인 분석

박종규<sup>1,†</sup> · 최만식<sup>2</sup> · 박진우<sup>3</sup> · 선철인<sup>4</sup> · 우준식<sup>5</sup> · 김태하<sup>6</sup> · 이효진<sup>7</sup>

<sup>1</sup>(주)지오시스템리서치 환경화학생태부 선임

<sup>2</sup>충남대학교 해양환경과학과 교수

<sup>3</sup>해양환경공단 해양수질팀 대리

<sup>4</sup>해양환경공단 해양수질팀 과장

<sup>5</sup>(주)지오시스템리서치 환경화학생태부 상무이사

<sup>6</sup>(주)지오시스템리서치 환경화학생태부 상무이사

<sup>7</sup>(주)지오시스템리서치 환경화학생태부 부사장

## Source Identification of Metal Pollution in Commercial Ports Using Copper Release

Jongkyu Park<sup>1,†</sup>, Mansik Choi<sup>2</sup>, Geonwoo Park<sup>3</sup>, Chulin Sun<sup>4</sup>, Junsik Woo<sup>5</sup>

Taeha Kim<sup>6</sup>, and Hyojin Lee<sup>7</sup>

<sup>1</sup>Senior Engineer, Department of Environmental Chemistry and Ecology, Geosystem Research Corporation, Gyeonggi 15807, Korea

<sup>2</sup>Professor, Department of Marine Environmental Science, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

<sup>3</sup>Researcher, Marine Environment Monitoring Team, Korea Marine Environment Management Corporation (KOEM), Busan 49111, Korea

<sup>4</sup>Senior Researcher, Marine Environment Monitoring Team, Korea Marine Environment Management Corporation (KOEM), Busan 49111, Korea

<sup>5</sup>Managing Director, Department of Environmental Chemistry and Ecology, Geosystem Research Corporation, Gyeonggi 15807, Korea

<sup>6</sup>Managing Director, Department of Environmental Chemistry and Ecology, Geosystem Research Corporation, Gyeonggi 15807, Korea

<sup>7</sup>Senior Executive Vice President, Department of Environmental Chemistry and Ecology, Geosystem Research Corporation, Gyeonggi 15807, Korea

### 요 약

본 연구는 국내 주요 무역항(인천항, 목포항, 울산항, 부산항, 포항항, 동해항)에서 선박에 도장된 방오도료로부터 유출되는 구리(Cu)의 용출량을 정량적으로 산정하고, 항만 내 해수 및 퇴적물 시료와 비교 분석함으로써 구리 오염의 기인 특성을 규명하고자 하였다. 선박 통계(Port-MIS), 선종별 제원, 용출률 자료를 기반으로 항만별 연간 구리 용출량을 산출하였고, 이를 해양환경측정망 자료의 해수 및 퇴적물 중금속 농도와 비교하였다. Mann-Whitney U test를 통해 항만 내부와 인접 정점 간 금속 농도의 통계적 유의성을 평가한 결과, 대부분의 항만에서 Cu 농도가 유의하게 높았으며, Zn, Pb, Cd 등 일부 중금속에서도 유사한 경향이 나타났다. 다만, 울산항의 경우 주변 산업단지의 영향 등 복합적 요인이 작용하는 것으로 해석되었다. 또한, 항만의 폐쇄도 지수와 퇴적물 중금속 농도 간의 상관분석을 통해 폐쇄도가 높은 항만일수록 특정 중금속의 축적 경향이 나타났다. 피어슨 상관분석과 요인분석 결과, 구리 오염은 선박 수, 총톤수, 침수면적 등 선박 활동과 밀접한 관련이 있었으며, Zn, Pb, Cd는 항만의 물리적 특성 및 비점오염원 등 복합적 요인과 관련됨을 확인하였다. 본 연구는 방오도료 유래 구리의 정량적 기여와 주요 중금속의 오염 원인을 통합적으로 분석하였으며, 향후 항만 내 오염원별 구리의 기여도 산정을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

<sup>†</sup>Corresponding author: jkpark@geosr.com

**Abstract** – This study aims to quantitatively estimate the copper (Cu) release from antifouling paints applied to vessels operating in six major trade ports in South Korea (Incheon, Mokpo, Ulsan, Busan, Pohang, and Donghae), and to identify the potential sources of Cu contamination by comparing the estimated values with seawater and sediment monitoring data from port areas. Based on ship statistics (Port-MIS), vessel specifications by type, and known copper release rates, the annual copper release each port was calculated. These estimates were then compared with concentrations of heavy metals in seawater and sediments derived from the Marine Environment Monitoring. Using the Mann–Whitney U test, the statistical significance of differences in metal concentrations between inner port areas and adjacent sites was evaluated. Cu concentrations were significantly higher inside the ports in most cases, with similar trends also observed for Zn, Pb, and Cd. However, in the case of Ulsan Port, the influence of surrounding industrial complexes appeared to contribute additional sources of contamination. Correlation analysis between the Closure Index and sedimentary metal concentrations revealed that ports with higher enclosure levels tended to exhibit greater accumulation of certain metals. Furthermore, Pearson correlation and factor analyses indicated that Cu contamination was closely related to vessel activities, including the number of ships, gross tonnage, and wetted surface area, while Zn, Pb, and Cd appeared to be influenced by a combination of physical port characteristics and non-point source pollution. This study provides a quantitative assessment of copper release from antifouling paints and an integrated analysis of the sources of major metal contaminants, offering a scientific basis for future evaluations of source-specific contributions to Cu pollution in port environments.

**Keywords:** Commercial ports(무역항), Marine Environment Monitoring(해양환경측정망), Antifouling paints(방오도료), Cu release(구리 용출량)

## 1. 서 론

항만은 선박의 입·출항, 접안, 하역 등의 기능을 수행하는 국가 기반시설로서(선박법 제2조 제1호), 선박 운항을 위한 핵심 인프라를 제공하는 동시에 다양한 해양 오염원의 집적지로 작용할 수 있다. 특히 항만은 구조적으로 반폐쇄된 공간이 많아 해수 교환이 제한되는 특성이 있으며, 선박에서 유출되는 오염물질이 해양환경에 미치는 영향이 크다(Schiff *et al.*[2004]). 중금속은 환경 중에서 쉽게 분해되지 않고 장기간 축적되며, 퇴적물과 수층을 통해 해양생물 및 인간 건강에까지 영향을 미치는 대표적인 유해물질이다(Forstner and Wittmann[1981]).

기존 연구는 선박 기인 오염물질 배출량 추정에 있어 주로 대기 오염물질이나 이산화탄소 등 기후영향 중심의 분석에 집중되어 왔으며(Berechman and Tseng [2012]; Yau *et al.*[2013]), 수질오염 측면에서는 선박 기인 유기오염물질 또는 누출사고 사례에 대한 정성적 접근이 대부분이었다. 항만 내 퇴적물 중에서 농도가 높게 관측되는 구리(Cu)는 방오도료, 타이어 및 브레이크 마모, 산업단지 폐수 등 다양한 인위적 기원을 가질 수 있으나, 그 중에서도 선박의 방오도료가 정량적으로 구리에 큰 기여를 하는 주요 오염원 중 하나로 지목되어 왔다(Voulvoulis *et al.*[2002]; Schiff *et al.*[2004]). 그러나 국내 항만을 대상으로 방오도료 기인 구리의 실제 용출량을 항만별로 산정하고, 해양환경 실측자료와 비교하여 오염 기여도를 정량적으로 평가한 연구는 거의 전무한 실정이다.

방오도료는 선체에 부착되는 해양생물의 성장을 억제하기 위해 사용되며, 선박 유지 관리에 필수적인 도료이다(Paik *et al.*[2013]). 과거 사용되던 TBT(Tributyltin) 기반 도료는 해양생물에 대한 높은 독성으로 인해 2008년 국제해사기구(IMO)에 의해 전면 금지되

었고(IMO[2001]), 이후 구리를 주성분으로 하여 해양생물의 부착을 효과적으로 억제할 수 있는 방오도료가 대체제로 널리 사용되기 시작하였다(Hearin *et al.*[2015]). 구리는 비교적 낮은 독성을 가지면서도 도료 생산이 용이하고 경제성이 높아, 다양한 선박 유형에 광범위하게 적용되고 있다. 그러나 낮은 농도에서도 일부 수생생물에 유해할 수 있으며, 항만의 폐쇄적 특성과 맞물려 해수 및 퇴적물 내에 지속적으로 축적될 가능성이 높다(Nimmo and Hamaker[1982]). 특히, 항만은 선박 밀도가 높고 체류시간이 길며, 폐쇄성 수역이 많아 이러한 누적 오염의 중심지로 기능할 수 있다. 또한, 최근에는 방오도료 외에도 도시 비점오염원, 산업단지 폐수 등 다양한 중금속 유입원이 항만 환경에 복합적으로 작용함에 따라, 단일 오염원이 아닌 다요인 기반의 통합적 오염기여 분석이 요구되고 있다.

이에 본 연구에서는 동·서·남해를 대표하는 6개 주요 무역항(부산항, 울산항, 인천항, 동해항, 포항항, 목포항)을 대상으로, 선박 제원(선박 수, 총톤수, 침수면적 등)에 기반하여 항만별 구리 용출량을 산정하고, 이를 해양환경측정망을 통해 수집된 해수 및 퇴적물 내 중금속 농도와 비교하였다. 또한, 통계기법(피어슨 상관분석 및 요인분석)을 활용하여 선박 활동, 항만의 폐쇄도, 금속 농도 간의 연관성을 정량적으로 분석하였으며, 구리를 포함한 Zn, Pb, Cd, Cr, Ni, Co 등 주요 중금속의 기인 특성 및 공간적 차이를 규명하였다.

이 연구는 항만 내 중금속 오염의 주요 원인을 통계적으로 파악하고, 선박 활동과 물리적 환경 특성 간의 연계성을 정량적으로 분석함으로써 항만 환경 내 중금속 분포 특성에 대한 이해를 높이고자 하였다. 이를 통해 향후 항만별 중금속 오염원 기여도 산정과 효과적인 오염 저감 방안 수립에 필요한 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 연구 지역

본 연구는 해양수산부가 수행한 ‘해양환경측정망(Marine Environment Monitoring)’ 자료를 기반으로 하였으며, 시료의 조사는 해양수산부 「해양환경측정망 구성 및 운영계획」(해양수산부 고시 제 2023-17호) 및 분석은 「해양환경공정시험기준」(국립수산과학원 고시 제 2023-5호)에 따라 수행되었다.

연구 대상은 국내 주요 무역항 중 지리적 대표성과 물동량 등을 고려하여 선정된 부산항, 울산항, 인천항, 동해항, 포항항, 목포항 등 총 6개 항만이다. 각 항만은 해양환경측정망 중 항만환경측정망 정점에 해당하며, 비교 대상으로는 동일 권역 내에 위치한 하천영향 및 반폐쇄성 해역환경측정망 정점 중 항만 인근 해역을 대표할 수 있는 정점을 선정하였고, 해당 정점들에서 2014년부터 2023년까지 정기적으로 수집된 해수 및 퇴적물 내 중금속 자료를 이용하였다(Table 1).

### 2.2 선박으로부터 용출된 구리의 용출량 산정

#### 2.2.1 선박 입출항 자료 수집

항만별 선박으로부터의 구리 용출량 산정을 위해, 해양수산부에서 운영하는 항만운영정보시스템(Port-MIS: Port Management Information System)을 활용하였다. Port-MIS는 국내 주요 항만을 대상으로 입·출항하는 선박의 체원 및 운항 정보를 기록한 국가 통합 시스템으로, 본 연구에서는 해당 시스템을 통해 연구 대상 6개 무역항(부산항, 울산항, 인천항, 동해항, 포항항, 목포항)에 입항한 선박에 대한 자료를 수집하였다.

수집 항목은 선박수, 선박 총톤수(Gross Tonnage, G/T), 입출항 횟수, 선종 및 입항 연도 등의 세부 항목으로 구성되며, 구리 용출량 추정에 활용하기 위해 2014년부터 2023년까지 10년간의 데이터를 활용하였다(Table 2).

#### 2.2.2 선박의 용도별 구분

항만에는 다양한 용도와 크기의 선박이 입항하기 때문에, 구리 용출량 산정을 위해 선박을 일정 기준에 따라 범주화하는 과정이 필요하다. 본 연구에서는 Port-MIS에서 수집한 자료를 기반으로 총 51개의 선박 유형을 확인하였으며, 이들을 Moser *et al.*[2016]가 제안한 선박 용도별 9개 분류체계에 따라 재구성하였다.

Moser *et al.*[2016]는 선박을 주요 기능 및 운송 목적에 따라 유조선(Tankers), 컨테이너선(Container ships), 일반화물선(General cargo ships), 벌크선(Bulk carriers), 가스 운반선(LNG/LPG carriers), 여객선(Passenger ships), 예인선(Tugs/supply vessels), 어선(Fishing vessels), 기타선(Other) 등 9개로 구분하였다(Table 3). 각 항만에 입항한 선박들은 이 분류에 맞춰 할당되었으며, 유형별 평균 체원과 침수면적(WSA) 산정을 통해 이후 구리 용출량 계산에 적용되었다.

**Table 1.** Marine Environment Monitoring data collection information

| Study region       | Station | Data acquisition period(month) |                           |
|--------------------|---------|--------------------------------|---------------------------|
|                    |         | Sediment                       | Seawater                  |
| Busan port         | HK1435  | 2019~2023<br>(Feb.)            | 2019~2023<br>(Feb., Aug.) |
|                    | HK1436  |                                |                           |
|                    | HK1437  |                                |                           |
|                    | HK1438  |                                |                           |
|                    | HK1439  |                                |                           |
| Adjacent port site | BK1417  | 2014~2023<br>(Feb.)            | 2014~2023<br>(Feb., Aug.) |
|                    | BK1418  |                                |                           |
|                    | BK1419  |                                |                           |
|                    | BK1420  |                                |                           |
|                    | BK1421  |                                |                           |
|                    | BK1422  |                                |                           |
| Ulsan port         | HK1520  | 2019~2023<br>(Feb.)            | 2019~2023<br>(Feb., Aug.) |
| Adjacent port site | BK1509  | 2014~2023<br>(Feb.)            | 2014~2023<br>(Feb., Aug.) |
|                    | BK1510  |                                |                           |
|                    | BK1511  |                                |                           |
|                    | BK1512  |                                |                           |
|                    | BK1513  |                                |                           |
|                    | BK1514  |                                |                           |
|                    | BK1515  |                                |                           |
|                    | BK1516  |                                |                           |
|                    | BK1506  |                                |                           |
| Incheon port       | HC0139  | 2019~2023<br>(Feb.)            | 2019~2023<br>(Feb., Aug.) |
| Adjacent port site | BC0101  | 2014~2023<br>(Feb.)            | 2014~2023<br>(Feb., Aug.) |
|                    | BC0102  |                                |                           |
|                    | BC0103  |                                |                           |
|                    | BC0104  |                                |                           |
|                    | BC0105  |                                |                           |
|                    | BC0106  |                                |                           |
| Donghae port       | HE2553  | 2014~2023<br>(Feb.)            | 2014~2023<br>(Feb., Aug.) |
| Adjacent port site | CE2523  |                                |                           |
| Pohang port        | HE1613  | 2019~2023<br>(Feb.)            | 2019~2023<br>(Feb., Aug.) |
|                    | HE1612  |                                |                           |
| Adjacent port site | BE1602  | 2014~2023<br>(Feb.)            | 2014~2023<br>(Feb., Aug.) |
|                    | BE1606  |                                |                           |
|                    | BE1611  |                                |                           |
| Mokpo port         | HW0612  | 2019~2023<br>(Feb.)            | 2019~2023<br>(Feb., Aug.) |
| Adjacent port site | HW0613  | 2014~2023<br>(Feb.)            | 2014~2023<br>(Feb., Aug.) |
|                    | BW0602  |                                |                           |
|                    | BW0604  |                                |                           |

#### 2.2.3 선박 침수면적(WSA) 산정 및 구리 용출률

선박 침수면적(Wetted Surface Area, WSA)은 선박이 정지 상태에서 해수와 직접 접촉하는 선체 외판의 면적으로, 선박 체원에 따라 경험적 공식으로 산정된다. 본 연구에서는 Moser *et al.*[2016]가 제안한 선박 용도별 평균 WSA 산정식을 활용하여, 각 선박 유형별 평균 선박침수면적을 계산하였다(Table 4).

구리 용출률은 방오도료로부터 일정 시간 동안 구리 이온이 해

**Table 2.** The ship information for 6 ports from 2014 to 2023

| Study region | Year | No. of ships (ship) | Gross tonnage (t) | Dwell time (day) | Wetted Surface Area (m <sup>2</sup> ) | Cu release (ton/year) |
|--------------|------|---------------------|-------------------|------------------|---------------------------------------|-----------------------|
| Busan port   | 2014 | 48,183              | 80,317            | 55               | 352,627                               | 919                   |
|              | 2015 | 49,923              | 82,950            | 56               | 364,859                               | 1,020                 |
|              | 2016 | 51,158              | 83,614            | 55               | 368,111                               | 1,052                 |
|              | 2017 | 50,021              | 86,029            | 57               | 386,481                               | 1,153                 |
|              | 2018 | 48,051              | 88,643            | 54               | 405,705                               | 1,074                 |
|              | 2019 | 48,216              | 96,542            | 50               | 419,873                               | 1,108                 |
|              | 2020 | 45,989              | 96,126            | 63               | 401,462                               | 1,243                 |
|              | 2021 | 43,534              | 99,852            | 52               | 407,626                               | 1,353                 |
|              | 2022 | 45,270              | 96,755            | 56               | 404,443                               | 1,401                 |
|              | 2023 | 45,421              | 94,060            | 49               | 370,289                               | 898                   |
| Mean S.D.    |      | 47,577 ± 2,453      | 90,489 ± 6,984    | 55 ± 4           | 388,148 ± 22,765                      | 1,122 ± 169           |
| Ulsan port   | 2014 | 25,998              | 101,768           | 28               | 324,632                               | 644                   |
|              | 2015 | 25,889              | 104,113           | 27               | 325,859                               | 571                   |
|              | 2016 | 25,266              | 110,399           | 36               | 350,128                               | 651                   |
|              | 2017 | 24,094              | 114,294           | 38               | 373,004                               | 732                   |
|              | 2018 | 23,375              | 115,231           | 61               | 374,175                               | 729                   |
|              | 2019 | 23,874              | 116,944           | 65               | 380,208                               | 813                   |
|              | 2020 | 24,029              | 116,202           | 59               | 368,375                               | 688                   |
|              | 2021 | 23,861              | 117,896           | 69               | 394,303                               | 849                   |
|              | 2022 | 24,368              | 118,090           | 119              | 392,978                               | 822                   |
|              | 2023 | 24,343              | 117,122           | 67               | 367,267                               | 686                   |
| Mean S.D.    |      | 24,510 ± 898        | 113,206 ± 5,876   | 57 ± 27          | 365,093 ± 24,541                      | 719 ± 89              |
| Incheon port | 2014 | 17,753              | 107,859           | 28               | 408,547                               | 390                   |
|              | 2015 | 19,008              | 105,388           | 31               | 401,085                               | 456                   |
|              | 2016 | 18,719              | 104,142           | 31               | 381,636                               | 451                   |
|              | 2017 | 18,122              | 108,411           | 40               | 400,572                               | 391                   |
|              | 2018 | 15,732              | 116,797           | 58               | 438,214                               | 467                   |
|              | 2019 | 14,931              | 117,690           | 53               | 453,294                               | 497                   |
|              | 2020 | 15,566              | 118,691           | 41               | 446,630                               | 487                   |
|              | 2021 | 15,756              | 134,300           | 51               | 483,923                               | 416                   |
|              | 2022 | 14,762              | 135,048           | 40               | 494,744                               | 420                   |
|              | 2023 | 14,266              | 139,736           | 54               | 521,275                               | 430                   |
| Mean S.D.    |      | 16,462 ± 1,760      | 118,806 ± 13,209  | 43 ± 11          | 442,992 ± 46,105                      | 441 ± 37              |
| Donghae port | 2014 | 4,220               | 39,119            | 78               | 215,897                               | 115                   |
|              | 2015 | 4,050               | 50,631            | 36               | 262,569                               | 122                   |
|              | 2016 | 3,979               | 45,895            | 24               | 230,453                               | 92                    |
|              | 2017 | 4,289               | 34,057            | 25               | 163,520                               | 86                    |
|              | 2018 | 4,071               | 30,446            | 39               | 165,046                               | 112                   |
|              | 2019 | 4,036               | 33,286            | 26               | 167,777                               | 109                   |
|              | 2020 | 3,823               | 30,162            | 240              | 164,292                               | 96                    |
|              | 2021 | 4,090               | 38,429            | 49               | 187,081                               | 104                   |
|              | 2022 | 3,669               | 34,104            | 38               | 175,489                               | 124                   |
|              | 2023 | 3,619               | 40,133            | 40               | 193,735                               | 131                   |
| Mean S.D.    |      | 3,985 ± 219         | 37,626 ± 6,649    | 60 ± 65          | 192,586 ± 33,695                      | 109 ± 15              |
| Pohang port  | 2014 | 1,943               | 46,068            | 30               | 200,229                               | 31                    |
|              | 2015 | 2,815               | 39,189            | 70               | 150,567                               | 27                    |
|              | 2016 | 1,843               | 39,328            | 59               | 102,828                               | 17                    |
|              | 2017 | 1,853               | 54,076            | 38               | 154,402                               | 21                    |
|              | 2018 | 1,877               | 60,060            | 78               | 154,093                               | 53                    |
|              | 2019 | 1,888               | 57,458            | 59               | 151,191                               | 18                    |
|              | 2020 | 1,809               | 47,543            | 50               | 133,118                               | 16                    |
|              | 2021 | 1,761               | 63,851            | 129              | 161,090                               | 54                    |
|              | 2022 | 1,650               | 55,445            | 35               | 177,434                               | 17                    |
|              | 2023 | 1,762               | 52,564            | 208              | 162,189                               | 31                    |
| Mean S.D.    |      | 1,920 ± 325         | 51,558 ± 8,363    | 75 ± 54          | 154,714 ± 25,545                      | 28 ± 14               |

**Table 2.** (Continued)

| Study region | Year | No. of ships (ship) | Gross tonnage (t) | Dwell time (day) | Wetted Surface Area (m <sup>2</sup> ) | Cu release (ton/year) |
|--------------|------|---------------------|-------------------|------------------|---------------------------------------|-----------------------|
| Mokpo port   | 2014 | 1,657               | 20,408            | 85               | 116,301                               | 38                    |
|              | 2015 | 1,776               | 18,269            | 105              | 92,212                                | 31                    |
|              | 2016 | 1,739               | 18,620            | 92               | 97,992                                | 30                    |
|              | 2017 | 1,839               | 21,970            | 116              | 114,780                               | 43                    |
|              | 2018 | 1,993               | 17,236            | 159              | 75,874                                | 21                    |
|              | 2019 | 1,995               | 130,161           | 143              | 441,079                               | 14                    |
|              | 2020 | 1,791               | 25,385            | 70               | 124,627                               | 19                    |
|              | 2021 | 1,800               | 28,324            | 131              | 154,981                               | 31                    |
|              | 2022 | 2,479               | 23,099            | 57               | 126,643                               | 37                    |
|              | 2023 | 2,125               | 49,188            | 97               | 210,872                               | 17                    |
| Mean S.D.    |      | 1,919 ± 242         | 35,266 ± 34,611   | 105 ± 32         | 155,536 ± 107,111                     | 28 ± 10               |

**Table 3.** Classification of vessels by purpose (Moser *et al.* [2016])

| Vessel type             | Type of vessels by purpose   |
|-------------------------|--|
| Tugs and supply vessels | Towing tug, Tug boat, For berthing tug, other tug, Pusher, Ship's tender, Pilot boat, Tug & barge  |
| Other ships             | Other ship, Government ship, Warship, Police ship, Plying boat, Waste carrier, Ohter barge, Water sports equipment, Dredging vessel, Other barge, For construction barge, For general cargo barge, For oli product barge |
| Passenger ships         | International ferry, Passenger ship, Cargo-passenger ship, Cruise ship, Car carrier  |
| Tankers                 | Other tanker, Oil product tanker, Chemical tanker, Chemical gas tanker, Crude oil tanker   |
| General cargo           | General cargo  |
| Fishing vessels         | Long-range fishing vessel, Coastal fishing vessel  |
| Bulkers                 | Sand, Coal, Cement, Steel, Ore, Wood, Coil, Hot coil Carrier, Bulk carrier   |
| Container ships         | Full container ship, Semi-container ship, Reefer container ship  |
| LNG&LPG carriers        | LNG carrier, LPG carrier   |

**Table 4.** The information of required for estimating WSA and DWT calculation formula (Moser *et al.* [2016])

| Vessel type             | GT(Gross tonnage) | Coefficient | DWT(Dead Weight tonnage) | Coefficient | Exponent | WSA                                      |
|-------------------------|-------------------|-------------|--------------------------|-------------|----------|--|
| Tugs and supply vessels |                   | 0.847       |                          | 19.36       | 0.5530   | DWT ×<br>Coefficient <sup>Exponent</sup> |
| Other ships             |                   | 1.658       |                          | 26.20       | 0.5510   |  |
| Passenger ships         |                   | 0.095       |                          | 14.64       | 0.6710   |  |
| Tankers                 |                   | 1.971       |                          | 9.56        | 0.6300   |  |
| General cargo           | This study        | 1.307       | GT × Coefficient         | 14.24       | 0.5960   |  |
| Fishing vessels         |                   | 0.845       |                          | 15.58       | 0.6020   |  |
| Bulkers                 |                   | 1.861       |                          | 9.57        | 0.6300   |  |
| Container ships         |                   | 1.038       |                          | 5.39        | 0.6980   |  |
| LNG&LPG carriers        |                   | 1.000       |                          | 5.41        | 0.6990   |  |

수로 확산되는 속도를 의미하며, 본 연구에서는 Jalkanen *et al.*[2021] 이 제시한 국제 방오도료의 평균 용출률인 24.491 µg/cm<sup>2</sup>/day를 적용하였다. 이 값은 대형 상선의 일반적인 방오도료 적용 사례를 기반으로 도출된 값이며, 국내 실측 자료가 부족한 점을 고려해 보수적으로 채택하였다. 모든 선박에 동일한 용출률이 적용된 것은 실제 차이를 단순화한 것으로, 상대적 비교와 추정치를 제공하는 데 목적이 있다.

2.2.4 구리 용출량 산정

선박으로부터 방오도료를 통해 해수로 용출되는 구리의 총량은 선박의 침수면적, 체류시간, 구리 용출률을 곱한 식 (1)을 통해 산정하였다. 계산에 사용된 주요 변수들은 선박 입출항 기록 및 문헌 자

료를 바탕으로 설정하였다.

$$Cu\ release = W \times D \times C \times F_1 \times F_2 \tag{1}$$

식에서 W는 WSA(Wetted Surface Area, cm<sup>2</sup>), D는 선박체류시간(일), C는 구리 용출률(24.491 µg/cm<sup>2</sup>/day), F<sub>1</sub>은 도장적용계수(Paint Application Factor, 국제 기준값: 1), F<sub>2</sub>는 살생물제 적용계수(Biocide Application Factor, 국제 기준 값: 1)이다. 선박의 체류 시간(일)은 Port-MIS의 입출항 시각 기록을 기반으로 선박 유형별 평균 체류 시간을 계산하여 적용하였다. 방오도료 관련 적용계수는 국내 항만별 상세한 방오도료 종류 및 도장 면적과 구체적인 도료 성분에 대한 정보가 부족하기 때문에 국제적으로 통용되는 평균 적용계수인 F<sub>1</sub>=1, F<sub>2</sub>=1을 기본값으로 설정하였다.

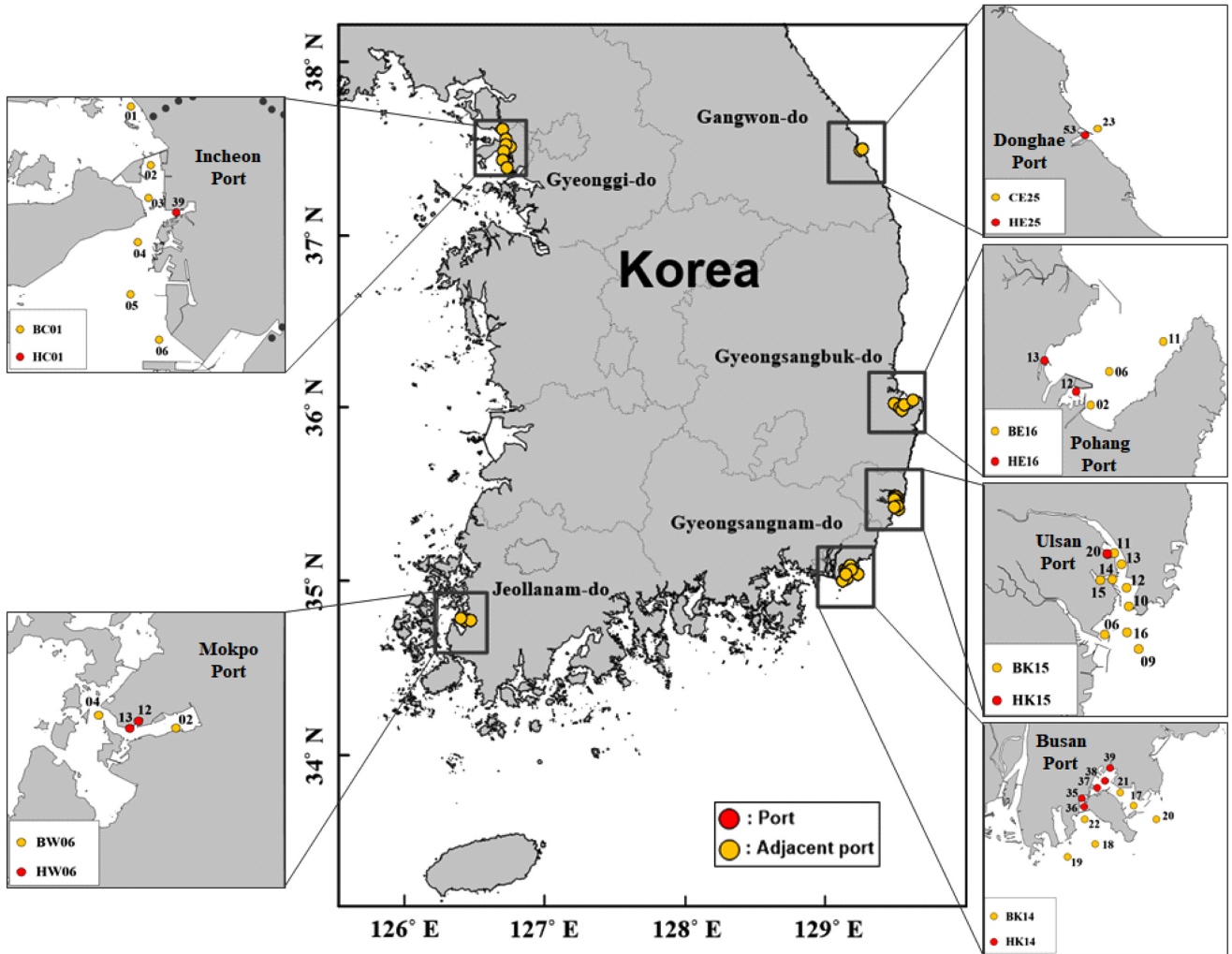


Fig. 1. A map showing the sampling locations at 6 ports(Busan, Ulsan, Incheon, Donghae, Pohang, Mokpo) and adjacent port sites.

2.2.5 항만 폐쇄도 지수 산정

항만의 해수 교환 특성을 평가하기 위해, International EMECS Center[2001]에서 보고한 폐쇄도 지수(Closure Index)가 있으며, 폐쇄성 해역을(Enclosed bay) 아래 식 (2)과 같이 정의하고 있다(Kim et al.[2016]).

$$Closure\ Index\ (CI) = \sqrt{s} \times D_1 / W \times D_2 \geq 1 \quad (2)$$

이 식에서 S는 항만 전체 면적(km<sup>2</sup>), W는 만의 입구 경계선의 길이(km), D<sub>1</sub>은 만의 최대 수심(m), D<sub>2</sub>는 만 입구 경계의 수심을 나타낸다.

항만 폐쇄도지수를 산정하기 위해 사용된 변수인 S(항만 전체 면적, km<sup>2</sup>), W(만 입구 경계선의 길이, km), D<sub>1</sub>(만의 최대 수심, m), D<sub>2</sub>(만 입구 경계 수심, m)는 다음과 같이 산정하였다. 항만의 면적(S)과 입구 경계선의 길이(W)는 해양수산부에서 제공하는 항만 경계 shapefile을 바탕으로 QGIS 3.10.9 프로그램을 활용하여 계산하였으며, 수심 정보(D1, D2)는 국립해양조사원이 운영하는 ‘개방해(Open Ocean Data)’ 플랫폼에서 2023년 기준 항만 수심 데이터를

기반으로 수집하였다.

폐쇄도 지수 값이 1.0 이상일 경우, 해당 항만은 해수 교환이 제한된 폐쇄성 해역으로 간주된다. 각 항만의 폐쇄도 지수를 산정하였으며(Table 7), 항만 내 구리의 용출량에 영향을 미치는 요인을 파악하기 위한 자료로 활용되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 항만 및 항만 인접 정점에서의 해수 중 중금속의 분포 특성

2014년부터 2023년까지의 해양환경측정망 자료를 활용하여 6개 주요 항만 및 인접 정점의 해수 중 중금속(Cu, Zn, Pb, Cd, Cr<sup>6+</sup>, As) 농도를 비교·분석한 결과(Table 5), 일부 중금속은 항만 내부의 농도가 인접 해역보다 상대적으로 높았으며, 특히 Cu는 대부분의 항만에서 농도가 인접 해역보다 높게 나타나 대표적인 공간분포 항목으로 제시되었다(Fig. 2). 또한, 항만과 인접 해역 간 농도 차이의 통계적 유의성을 확인하고 항만 활동과의 연관 가능성을 정량적으로 평가하기 위해 Mann-Whitney U test를 실시하였다.

**Table 5.** The metal concentrations in seawater in the studied area from 2014 to 2023

| Study region | Year        | St.         | Cu          | Zn            | Pb          | Cd          | Cr <sup>6+</sup> | As          |
|--------------|-------------|-------------|-------------|---------------|-------------|-------------|------------------|-------------|
| Busan Port   | 2019~2023   | HK1435      | 0.94 ± 0.40 | 2.45 ± 1.89   | 0.06 ± 0.09 | 0.02 ± 0.01 | 0.16 ± 0.04      | 1.41 ± 0.20 |
|              |             | HK1436      | 0.61 ± 0.23 | 1.97 ± 1.31   | 0.09 ± 0.11 | 0.02 ± 0.01 | 0.21 ± 0.17      | 1.36 ± 0.18 |
|              |             | HK1437      | 1.45 ± 0.54 | 4.10 ± 2.33   | 0.05 ± 0.06 | 0.02 ± 0.01 | 0.17 ± 0.05      | 1.45 ± 0.28 |
|              |             | HK1438      | 1.54 ± 0.50 | 5.05 ± 2.93   | 0.09 ± 0.07 | 0.02 ± 0.01 | 0.16 ± 0.05      | 1.36 ± 0.16 |
|              |             | HK1439      | 1.72 ± 0.44 | 6.76 ± 3.49   | 0.10 ± 0.15 | 0.02 ± 0.01 | 0.15 ± 0.04      | 1.32 ± 0.12 |
|              | Average     | 1.25 ± 0.59 | 4.07 ± 2.98 | 0.08 ± 0.10   | 0.02 ± 0.01 | 0.17 ± 0.08 | 1.38 ± 0.19      |             |
|              | 2014~2023   | BK1417      | 0.82 ± 0.57 | 2.34 ± 1.30   | 0.06 ± 0.07 | 0.02 ± 0.01 | 0.13 ± 0.07      | 1.31 ± 0.34 |
|              |             | BK1418      | 0.48 ± 0.40 | 1.52 ± 1.11   | 0.05 ± 0.05 | 0.02 ± 0.01 | 0.13 ± 0.07      | 1.34 ± 0.25 |
|              |             | BK1419      | 0.48 ± 0.25 | 1.64 ± 1.33   | 0.08 ± 0.20 | 0.02 ± 0.01 | 0.13 ± 0.07      | 1.40 ± 0.34 |
|              |             | BK1420      | 0.43 ± 0.32 | 1.52 ± 1.90   | 0.07 ± 0.06 | 0.02 ± 0.01 | 0.14 ± 0.08      | 1.35 ± 0.31 |
| BK1421       |             | 1.18 ± 0.44 | 4.18 ± 2.66 | 0.07 ± 0.08   | 0.02 ± 0.01 | 0.24 ± 0.5  | 1.32 ± 0.32      |             |
| BK1422       |             | 0.67 ± 1.13 | 1.76 ± 1.62 | 0.11 ± 0.17   | 0.02 ± 0.01 | 0.13 ± 0.06 | 1.30 ± 0.32      |             |
| Average      | 0.68 ± 0.64 | 2.16 ± 1.94 | 0.07 ± 0.12 | 0.02 ± 0.01   | 0.15 ± 0.21 | 1.34 ± 0.31 |                  |             |
| Ulsan Port   | 2019~2023   | HK1520      | 1.12 ± 0.30 | 4.75 ± 0.93   | 0.20 ± 0.36 | 0.06 ± 0.03 | 0.15 ± 0.04      | 1.94 ± 0.35 |
|              |             | Average     | 0.38 ± 0.18 | 2.31 ± 1.84   | 0.07 ± 0.05 | 0.03 ± 0.02 | 0.17 ± 0.19      | 1.48 ± 0.23 |
|              | 2014~2023   | BK1509      | 0.38 ± 0.18 | 2.31 ± 1.84   | 0.07 ± 0.05 | 0.03 ± 0.02 | 0.17 ± 0.19      | 1.48 ± 0.23 |
|              |             | BK1510      | 0.95 ± 0.39 | 4.11 ± 1.96   | 0.13 ± 0.20 | 0.05 ± 0.03 | 0.15 ± 0.06      | 1.54 ± 0.31 |
|              |             | BK1511      | 0.99 ± 0.31 | 4.59 ± 1.72   | 0.14 ± 0.18 | 0.05 ± 0.03 | 0.12 ± 0.05      | 1.72 ± 0.49 |
|              |             | BK1512      | 0.99 ± 0.33 | 4.79 ± 3.25   | 0.21 ± 0.71 | 0.05 ± 0.03 | 0.16 ± 0.16      | 1.69 ± 0.30 |
|              |             | BK1513      | 1.04 ± 0.32 | 4.39 ± 1.69   | 1.29 ± 4.76 | 0.05 ± 0.03 | 0.13 ± 0.07      | 1.71 ± 0.41 |
|              |             | BK1514      | 1.29 ± 0.54 | 9.47 ± 11.69  | 0.11 ± 0.13 | 0.07 ± 0.04 | 0.21 ± 0.28      | 1.87 ± 0.71 |
|              |             | BK1515      | 1.67 ± 0.89 | 15.91 ± 21.33 | 0.13 ± 0.12 | 0.07 ± 0.03 | 0.18 ± 0.10      | 2.40 ± 1.80 |
|              |             | BK1516      | 0.62 ± 0.28 | 3.81 ± 3.54   | 0.10 ± 0.06 | 0.07 ± 0.05 | 0.14 ± 0.07      | 1.58 ± 0.20 |
| BK1506       | 0.87 ± 0.26 | 5.60 ± 2.96 | 0.09 ± 0.06 | 0.06 ± 0.03   | 0.14 ± 0.07 | 1.55 ± 0.19 |                  |             |
| Average      | 0.98 ± 0.55 | 6.11 ± 9.11 | 0.25 ± 1.61 | 0.06 ± 0.04   | 0.16 ± 0.14 | 1.73 ± 0.74 |                  |             |
| Incheon Port | 2019~2023   | HC0139      | 2.80 ± 2.61 | 7.07 ± 5.72   | 0.11 ± 0.05 | 0.06 ± 0.02 | 0.55 ± 0.45      | 1.42 ± 0.23 |
|              |             | Average     | 2.13 ± 1.75 | 6.82 ± 8.63   | 0.74 ± 1.68 | 0.06 ± 0.01 | 0.83 ± 1.76      | 1.34 ± 0.32 |
|              | 2014~2023   | BC0101      | 2.13 ± 1.75 | 6.82 ± 8.63   | 0.74 ± 1.68 | 0.06 ± 0.01 | 0.83 ± 1.76      | 1.34 ± 0.32 |
|              |             | BC0102      | 1.75 ± 0.74 | 5.08 ± 4.74   | 0.32 ± 0.55 | 0.06 ± 0.02 | 0.44 ± 0.70      | 1.43 ± 0.29 |
|              |             | BC0103      | 1.77 ± 1.02 | 3.85 ± 3.69   | 0.20 ± 0.18 | 0.06 ± 0.03 | 0.29 ± 0.27      | 1.43 ± 0.36 |
|              |             | BC0104      | 1.60 ± 0.63 | 3.24 ± 2.01   | 0.19 ± 0.16 | 0.06 ± 0.02 | 0.26 ± 0.21      | 1.50 ± 0.32 |
|              |             | BC0105      | 1.42 ± 0.39 | 3.05 ± 1.75   | 0.17 ± 0.20 | 0.06 ± 0.02 | 0.32 ± 0.38      | 1.52 ± 0.27 |
|              |             | BC0106      | 1.11 ± 0.19 | 2.76 ± 2.02   | 0.10 ± 0.08 | 0.05 ± 0.01 | 0.19 ± 0.21      | 1.52 ± 0.30 |
| Average      | 1.63 ± 0.97 | 4.13 ± 4.63 | 0.28 ± 0.75 | 0.06 ± 0.02   | 0.39 ± 0.82 | 1.46 ± 0.31 |                  |             |
| Donghae Port | 2014~2023   | HE2553      | 1.15 ± 0.52 | 5.18 ± 2.38   | 0.14 ± 0.23 | 0.03 ± 0.01 | 0.15 ± 0.06      | 1.37 ± 0.27 |
|              | 2014~2023   | CE2523      | 0.46 ± 0.41 | 2.01 ± 1.97   | 0.05 ± 0.04 | 0.02 ± 0.01 | 0.14 ± 0.07      | 1.40 ± 0.33 |
| Pohang Port  | 2019~2023   | HE1613      | 1.70 ± 0.71 | 6.44 ± 3.87   | 0.08 ± 0.06 | 0.04 ± 0.01 | 0.24 ± 0.30      | 1.48 ± 0.26 |
|              |             | HE1612      | 0.82 ± 0.40 | 3.27 ± 1.82   | 1.34 ± 3.88 | 0.03 ± 0.01 | 0.16 ± 0.04      | 1.39 ± 0.18 |
|              | Average     | 1.26 ± 0.72 | 4.86 ± 3.36 | 0.71 ± 2.75   | 0.03 ± 0.01 | 0.20 ± 0.21 | 1.43 ± 0.22      |             |
|              | 2014~2023   | BE1602      | 0.51 ± 0.22 | 3.73 ± 4.03   | 0.05 ± 0.06 | 0.02 ± 0.01 | 0.16 ± 0.09      | 1.33 ± 0.27 |
| BE1606       |             | 0.59 ± 0.84 | 2.02 ± 1.54 | 0.11 ± 0.17   | 0.02 ± 0.01 | 0.13 ± 0.06 | 1.44 ± 0.29      |             |
| BE1611       |             | 0.39 ± 0.23 | 1.84 ± 1.48 | 0.16 ± 0.48   | 0.02 ± 0.01 | 0.18 ± 0.18 | 1.40 ± 0.26      |             |
| Average      | 0.50 ± 0.52 | 2.53 ± 2.73 | 0.11 ± 0.29 | 0.02 ± 0.01   | 0.16 ± 0.12 | 1.39 ± 0.27 |                  |             |
| Mokpo Port   | 2019~2023   | HW0612      | 1.61 ± 0.53 | 3.69 ± 2.72   | 0.20 ± 0.25 | 0.02 ± 0.01 | 0.13 ± 0.04      | 1.35 ± 0.28 |
|              |             | HW0613      | 1.22 ± 0.47 | 2.64 ± 2.14   | 0.14 ± 0.25 | 0.02 ± 0.01 | 0.12 ± 0.05      | 1.28 ± 0.51 |
|              |             | Average     | 1.41 ± 0.52 | 3.14 ± 2.42   | 0.16 ± 0.25 | 0.02 ± 0.01 | 0.13 ± 0.05      | 1.31 ± 0.41 |
|              | 2014~2023   | BW0602      | 1.33 ± 0.68 | 3.80 ± 4.90   | 0.13 ± 0.18 | 0.02 ± 0.01 | 0.16 ± 0.14      | 1.28 ± 0.24 |
|              |             | BW0604      | 1.00 ± 0.30 | 2.17 ± 1.97   | 0.10 ± 0.11 | 0.03 ± 0.01 | 0.15 ± 0.13      | 1.30 ± 0.29 |
| Average      | 1.17 ± 0.54 | 2.99 ± 3.78 | 0.12 ± 0.15 | 0.03 ± 0.01   | 0.16 ± 0.13 | 1.29 ± 0.26 |                  |             |

검정 결과, 포항항, 동해항, 목포항, 부산항에서는 Cu 농도가 항만 내부에서 통계적으로 유의하게 높은 것으로 나타났다(p < 0.05). 이 중 포항항에서는 Pb와 Cd, 동해항에서는 Zn 또한 유의한 차이를

보여(p < 0.05), 이들 금속 또한 항만 내부에서 상대적으로 높은 농도를 보였다.

Cu와 Zn은 선박, 마리나, 조선소 등에서 사용되는 방오도료의 주

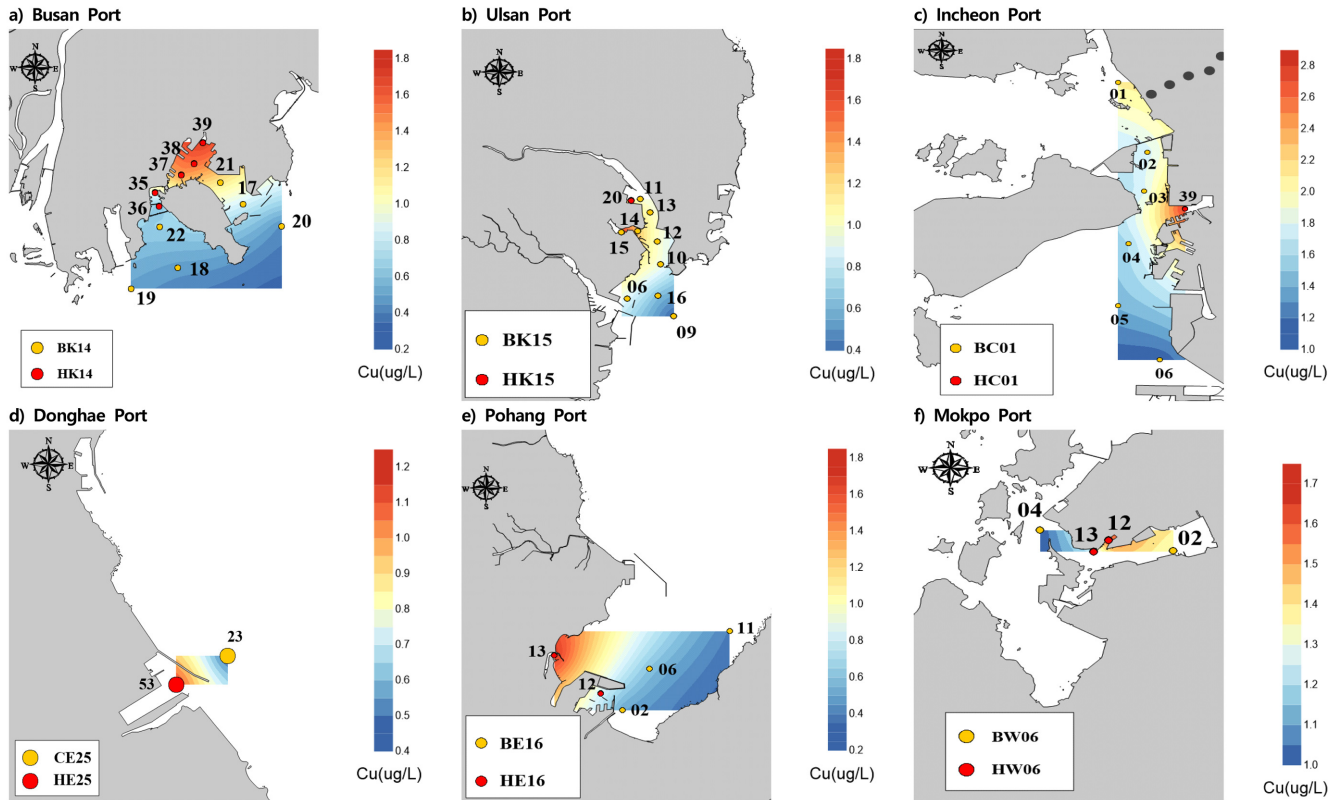


Fig. 2. Spatial distribution of Cu concentrations in the surface seawater at each port and adjacent port sites.

요 성분으로 알려져 있으며(Claissie and Alzieu[1993]; Cresswell *et al.*[2006]; Kim *et al.*[2015]; Schiff *et al.*[2007]), Pb와 Cd 역시 부식 저항성, 경화 특성, 불투명성 등의 이유로 방오도료에 일부 활용된 사례가 보고된 바 있다(Turner[2014]). 따라서 해당 금속들의 농도가 항만 내부에서 높게 나타난 결과는 방오도료 기인 가능성을 시사하는 간접적 근거로 해석될 수 있다.

반면, 울산항에서는 대부분의 중금속(Cu, Zn, Pb, Cd, Cr<sup>6+</sup>)에서 내·외측 간 유의한 차이가 나타나지 않았으며, As만이 항만 내부에서 유의하게 높게 나타났다( $p < 0.05$ ). 이는 방오도료보다는 인근의 석유화학, 비철금속, 조선 등 대규모 산업단지에서 유래한 복합적인 오염원의 영향을 더 크게 받고 있다는 기존 연구결과와 부합한다(Kim *et al.*[1996]; Baek *et al.*[2013]; Hwang *et al.*[2014]).

인천항의 경우 모든 중금속에서 통계적으로 유의한 차이는 확인되지 않았지만, Cu와 Zn의 평균 농도는 항만이 인접 정점보다 높은 경향을 보여 방오도료 또는 항만 활동과의 관련성을 완전히 배제하기는 어렵다. 다만 해당 해역은 조위, 유속 등 물리적 특성이 복합적으로 작용하는 지역이므로 보다 정밀한 평가를 위한 추가조사가 요구된다.

결론적으로, 통계적으로 유의한 농도 차이를 보인 Cu, Pb, Zn 및 Cd는 대부분 방오도료의 주요 구성물질이라는 점에서 항만 내 선박의 운항 및 정박 활동이 해수 중금속 오염에 기여하고 있음을 뒷받침한다.

### 3.2 항만 및 항만 인접 퇴적물 내 중금속의 분포 특성

2014년부터 2023년까지의 해양환경측정망 자료를 활용하여 6개 주요 항만(부산항, 울산항, 인천항, 동해항, 포항항, 목포항) 및 인접 정점의 퇴적물 중 중금속(Cu, Zn, Pb, Cd, Cr, Ni, Co, As) 농도를 비교·분석한 결과(Table 6), Cu는 대부분의 항만에서 항만 내부의 농도가 인접 정점보다 높게 나타나 대표적인 공간분포 항목으로 제시되었으며(Fig. 3), 항만과 인접 해역 간 농도 차이의 통계적 유의성을 확인하고 항만 활동과의 연관 가능성을 정량적으로 평가하기 위해 Mann-Whitney U test를 실시하였다.

그 결과, 부산항, 포항항, 동해항, 목포항에서는 Cu 농도가 항만 내부에서 유의하게 높게 나타났으며( $p < 0.05$ ), Zn, Pb 및 Cd 역시 일부 항만에서 통계적으로 유의한 차이를 보였다. 특히 이들 항만에서는 Cu, Zn, Pb 및 Cd 중 3종 이상의 금속이 유의하게 높게 나타나, 항만 내 선박의 정박, 도선, 유지·보수 등 해양 활동에 따른 영향 가능성을 시사하였다(Turner[2010]; Turner[2014]; Schiff *et al.*[2007]).

부산항에서는 Cu, Zn, Pb 및 Cd가 모두 인접 정점보다 유의하게 높은 농도를 보였으며( $p < 0.01$ ), 특히 Cu는 약 5.2배의 농도 차이를 나타내어, 조선소 밀집 및 선박 정박이 빈번한 항만 특성을 반영하는 사례로 해석될 수 있다. 동해항 또한 Zn과 Cd에서 각각 약 5.4배, 6.8배의 농도 차이를 보이며( $p < 0.05$ ), 항만 활동에 따른 가능성을 시사하였다.

포항항과 목포항에서도 Cu, Zn 및 Cd가 유의하게 높았으며( $p <$

**Table 6.** The metal concentrations in sediments in the studied area from 2014 to 2023

| Study region | Year        | St.          | Cu            | Zn            | Pb          | Cd          | Cr           | Ni         | Co         | As         |
|--------------|-------------|--------------|---------------|---------------|-------------|-------------|--------------|------------|------------|------------|
| Busan Port   | 2014~2023   | HK1435       | 228.8 ± 76.7  | 321.0 ± 48.2  | 76 ± 18     | 0.48 ± 0.13 | 76.7 ± 7.1   | 28.8 ± 2.5 | 12.2 ± 1.5 | 14.0 ± 2.3 |
|              |             | HK1436       | 178.6 ± 73.0  | 331.5 ± 174.5 | 74 ± 40.7   | 0.59 ± 0.50 | 84.5 ± 15.3  | 30.4 ± 3.4 | 11.9 ± 0.8 | 14.5 ± 4.0 |
|              |             | HK1437       | 213.5 ± 85.1  | 266.1 ± 57.5  | 60.1 ± 17.0 | 0.34 ± 0.15 | 80.2 ± 6.5   | 29.5 ± 1.4 | 12.0 ± 0.6 | 12.6 ± 1.5 |
|              |             | HK1438       | 105.4 ± 81.5  | 228.5 ± 154.5 | 51.0 ± 29.6 | 0.38 ± 0.46 | 75.6 ± 9.7   | 28.4 ± 3.3 | 11.3 ± 0.7 | 12.4 ± 3.2 |
|              |             | HK1439       | 120.5 ± 16.7  | 281.8 ± 29.5  | 55.4 ± 8.0  | 0.47 ± 0.19 | 76.3 ± 7.7   | 28.8 ± 3.7 | 11.8 ± 1.4 | 12.7 ± 1.6 |
|              | Average     | 169.4 ± 84.4 | 285.8 ± 112.3 | 63.3 ± 26.3   | 0.45 ± 0.33 | 78.6 ± 10   | 29.2 ± 3.0   | 11.8 ± 1.1 | 13.2 ± 2.7 |            |
|              | 2014~2023   | BK1417       | 32.8 ± 4.0    | 118.7 ± 14.0  | 31.1 ± 5.1  | 0.18 ± 0.04 | 66.2 ± 5.7   | 28.1 ± 3.1 | 11.0 ± 1.1 | 10.2 ± 1.8 |
|              |             | BK1418       | 23.0 ± 1.3    | 125.7 ± 24.4  | 30.6 ± 1.0  | 0.16 ± 0.05 | 70.4 ± 3.1   | 28.3 ± 2.3 | 12.4 ± 0.8 | 12.5 ± 1.8 |
|              |             | BK1419       | 25.1 ± 2.8    | 120.9 ± 12.5  | 31.5 ± 2.3  | 0.18 ± 0.04 | 69.3 ± 4.1   | 28.2 ± 2.2 | 12.5 ± 1.2 | 12.3 ± 2.6 |
|              |             | BK1420       | 34.2 ± 30.5   | 133.0 ± 29.0  | 34.4 ± 6.4  | 0.21 ± 0.08 | 72.6 ± 7.7   | 29.7 ± 3.2 | 11.9 ± 1.1 | 11.7 ± 2.4 |
| BK1421       |             | 50.8 ± 9.4   | 133.2 ± 20.0  | 31.2 ± 3.1    | 0.17 ± 0.03 | 61.1 ± 6.8  | 23.9 ± 3.6   | 9.6 ± 1.3  | 9.9 ± 2.3  |            |
| Average      | 29.7 ± 6.9  | 117.8 ± 16.7 | 32.7 ± 2.6    | 0.17 ± 0.05   | 69.0 ± 6.3  | 24.9 ± 4.2  | 11.2 ± 1.3   | 12.8 ± 3.6 |            |            |
| Ulsan Port   | 2014~2023   | HK1520       | 72.9 ± 11.5   | 214.1 ± 17.9  | 42.6 ± 3.2  | 0.62 ± 0.11 | 62.4 ± 3.1   | 31.5 ± 1.8 | 11.1 ± 0.9 | 19.1 ± 3.0 |
|              |             | BK1509       | 26.4 ± 2.9    | 119.8 ± 16.8  | 31.3 ± 2.2  | 0.22 ± 0.04 | 66.6 ± 5.5   | 29.3 ± 3.2 | 11.4 ± 1.0 | 10.7 ± 1.0 |
|              |             | BK1510       | 45.8 ± 4.6    | 155.0 ± 11.1  | 40.2 ± 1.8  | 0.26 ± 0.06 | 65.9 ± 2.6   | 30.7 ± 1.6 | 12.6 ± 0.4 | 16.4 ± 2.6 |
|              |             | BK1511       | 68.6 ± 14.9   | 205.3 ± 15.8  | 42.1 ± 3.1  | 0.51 ± 0.12 | 61.1 ± 4.6   | 29.7 ± 1.7 | 11.5 ± 0.6 | 21.6 ± 2.0 |
|              |             | BK1512       | 55.5 ± 11.8   | 163.5 ± 14.6  | 39.8 ± 3.6  | 0.27 ± 0.05 | 60.9 ± 4.3   | 28.3 ± 2.9 | 11.6 ± 1.1 | 18.0 ± 2.9 |
|              |             | BK1513       | 62.8 ± 14.4   | 183.8 ± 19.7  | 41.2 ± 3.2  | 0.33 ± 0.13 | 58.3 ± 3.6   | 28.4 ± 2.3 | 11.5 ± 0.8 | 21.0 ± 2.8 |
|              |             | BK1514       | 61.8 ± 10.8   | 181.7 ± 17.1  | 41.6 ± 3.5  | 0.31 ± 0.05 | 65.6 ± 4.0   | 31.6 ± 1.8 | 12.3 ± 0.5 | 20.6 ± 2.2 |
|              |             | BK1515       | 106.8 ± 17.3  | 253.3 ± 27.8  | 51.1 ± 7.8  | 0.50 ± 0.11 | 74.6 ± 3.2   | 33.3 ± 1.8 | 12.1 ± 0.7 | 19.2 ± 1.0 |
|              |             | BK1516       | 32.2 ± 6.0    | 117.4 ± 8.4   | 33.9 ± 3.8  | 0.25 ± 0.05 | 66.4 ± 4.5   | 29.0 ± 2.0 | 11.3 ± 0.8 | 10.9 ± 1.2 |
|              | Average     | 52.8 ± 10.1  | 202.7 ± 29.6  | 56.3 ± 9.9    | 0.42 ± 0.16 | 74.5 ± 9.5  | 32.2 ± 1.6   | 17.5 ± 2.7 | 12.8 ± 1.6 |            |
| Average      | 56.9 ± 24.7 | 175.8 ± 44.7 | 41.9 ± 8.8    | 0.34 ± 0.14   | 66.0 ± 7.2  | 30.3 ± 2.7  | 12.4 ± 2.1   | 16.8 ± 4.5 |            |            |
| Incheon Port | 2014~2023   | HC0139       | 43.8 ± 23.1   | 135.4 ± 50.3  | 30.6 ± 4.7  | 0.28 ± 0.22 | 78.4 ± 9.1   | 30.5 ± 4.0 | 12.5 ± 1.0 | 10.2 ± 1.6 |
|              |             | BC0101       | 19.0 ± 5.2    | 85.6 ± 20.3   | 25.3 ± 3.2  | 0.13 ± 0.05 | 66.8 ± 6.8   | 26.3 ± 6.7 | 10.7 ± 1.4 | 9.1 ± 2.2  |
|              |             | BC0102       | 18.3 ± 3.9    | 86.0 ± 12.9   | 28.1 ± 5.7  | 0.15 ± 0.07 | 61.7 ± 8.4   | 25.1 ± 2.6 | 11.1 ± 1.1 | 10.3 ± 3.3 |
|              |             | BC0103       | 19.5 ± 8.6    | 78.4 ± 16.1   | 25.7 ± 4.6  | 0.12 ± 0.04 | 61.1 ± 13.5  | 23.8 ± 5.8 | 10.4 ± 2.0 | 9.8 ± 2.6  |
|              |             | BC0104       | 15.8 ± 3.7    | 79.2 ± 22.2   | 23.1 ± 3.1  | 0.11 ± 0.04 | 62.8 ± 6.4   | 22.2 ± 3.0 | 10.1 ± 1.1 | 7.8 ± 1.3  |
|              |             | BC0105       | 16.3 ± 4.0    | 78.0 ± 19.0   | 27.4 ± 4.3  | 0.15 ± 0.10 | 61.9 ± 18.0  | 22.5 ± 6.3 | 10.4 ± 2.5 | 8.9 ± 2.5  |
|              |             | BC0106       | 17.5 ± 1.3    | 79.3 ± 5.2    | 24.5 ± 1.1  | 0.09 ± 0.02 | 66.0 ± 3.8   | 25.2 ± 2.2 | 11.0 ± 0.8 | 8.9 ± 2.1  |
|              | Average     | 17.7 ± 5.0   | 80.9 ± 16.4   | 25.6 ± 4.1    | 0.12 ± 0.06 | 63.3 ± 10.4 | 24.1 ± 4.7   | 10.6 ± 1.6 | 9.1 ± 2.4  |            |
| Average      | 43.8 ± 23.1 | 135.4 ± 50.3 | 30.6 ± 4.7    | 0.28 ± 0.22   | 78.4 ± 9.1  | 30.5 ± 4.0  | 12.5 ± 1.0   | 10.2 ± 1.6 |            |            |
| Donghae Port | 2014~2023   | HE2553       | 68.7 ± 11.0   | 643.1 ± 137.3 | 70.3 ± 10.9 | 2.11 ± 0.60 | 72.7 ± 6.3   | 29.9 ± 3.3 | 12.9 ± 1.7 | 22.4 ± 2.1 |
|              | 2014~2023   | CE2523       | 22.3 ± 7.7    | 120.2 ± 49.7  | 38.5 ± 8.5  | 0.31 ± 0.23 | 56.1 ± 17.9  | 22.6 ± 7.6 | 9.1 ± 2.8  | 15.2 ± 4.9 |
| Pohang Port  | 2014~2023   | HE1613       | 63.8 ± 17.7   | 231.0 ± 38.2  | 43.4 ± 4.6  | 0.75 ± 0.39 | 73.6 ± 33.7  | 24.2 ± 2.8 | 8.9 ± 0.8  | 15.3 ± 2.2 |
|              |             | HE1612       | 43.0 ± 9.5    | 211.1 ± 32.4  | 47.6 ± 7.7  | 0.49 ± 0.09 | 128.4 ± 56.1 | 25.1 ± 4.4 | 8.5 ± 1.1  | 17.3 ± 2.3 |
|              |             | Average      | 53.4 ± 17.4   | 221.0 ± 36.0  | 45.5 ± 6.5  | 0.62 ± 0.31 | 101.0 ± 53.1 | 24.6 ± 3.7 | 8.7 ± 1.0  | 16.3 ± 2.4 |
|              | 2014~2023   | BE1602       | 18.7 ± 3.0    | 140.5 ± 23.7  | 35.5 ± 4.5  | 0.27 ± 0.03 | 190.5 ± 97.0 | 25.3 ± 5.4 | 7.9 ± 0.6  | 14.7 ± 2.2 |
|              |             | Average      | 17.0 ± 4.7    | 127.9 ± 31.7  | 35.1 ± 6.5  | 0.28 ± 0.08 | 100.2 ± 84.7 | 19.3 ± 6.3 | 7.5 ± 1.5  | 12.7 ± 2.9 |
| Mokpo Port   | 2014~2023   | HW0612       | 65.9 ± 16.4   | 172.6 ± 24.6  | 37.3 ± 4.8  | 0.27 ± 0.08 | 79.7 ± 6.0   | 32.5 ± 2.0 | 13.8 ± 0.8 | 13.8 ± 2.0 |
|              |             | HW0613       | 24.8 ± 7.3    | 104.4 ± 12.5  | 27.6 ± 2.2  | 0.08 ± 0.01 | 79.6 ± 6.6   | 32.3 ± 3.5 | 14.3 ± 1.3 | 10.0 ± 1.7 |
|              |             | Average      | 45.3 ± 24.5   | 138.5 ± 39.8  | 32.4 ± 6.2  | 0.18 ± 0.11 | 79.7 ± 6.1   | 32.4 ± 2.8 | 14.1 ± 1.1 | 11.9 ± 2.6 |
|              | 2014~2023   | BW0602       | 22.4 ± 6.0    | 100.2 ± 11.6  | 25.7 ± 4.1  | 0.11 ± 0.03 | 64.5 ± 7.8   | 25.1 ± 3.1 | 11.2 ± 1.3 | 8.9 ± 1.5  |
|              |             | Average      | 20.0 ± 5.1    | 94.5 ± 12.7   | 25.6 ± 3.2  | 0.09 ± 0.04 | 68.9 ± 9.2   | 27.1 ± 4.0 | 12.2 ± 1.7 | 9.1 ± 1.8  |

0.05), 포항항의 경우 Pb에서도 유의한 차이를 보여(p < 0.001), 방오도로 성분으로 알려진 금속들이 항만 내 퇴적물에 농축되고 있을 가능성을 보여준다.

한편, 울산항에서는 대부분의 금속(Cu, Zn, Pb, Cr, Ni 등)에서 유의한 차이가 확인되지 않았고, Cd만이 항만 내부에서 다소 높은 농도를 보였다(p < 0.01). 이는 해당 해역이 석유화학, 금속채련, 하

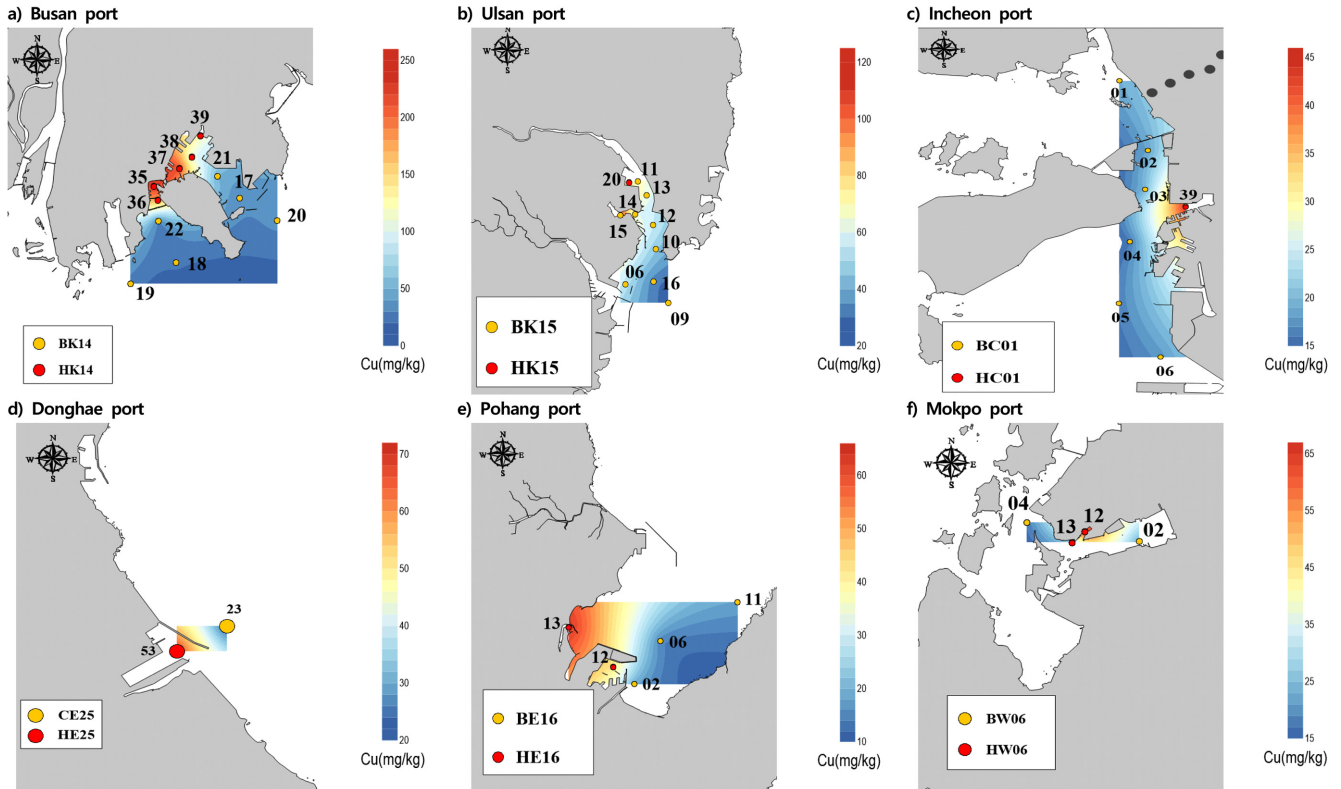


Fig. 3. Spatial distribution of Cu concentrations in surface sediments at each port and adjacent port sites.

수처리장 등 다양한 육상점오염원의 영향을 복합적으로 받는다는 점에서, 선박 활동보다는 산업단지 기원의 영향을 반영하는 것으로 해석된다(Baek *et al.*[2013]; Hwang *et al.*[2014]).

인천항의 경우 Cu, Zn 및 Cd에서 유의한 차이를 보였지만( $p < 0.01$ ), 농도 차이는 타 항만 대비 상대적으로 작았다. 이 지역은 조위, 유속 등 다양한 물리적 인자가 작용하는 해역으로, 중금속 농도에 영향을 미치는 다양한 해양환경 요인들을 종합적으로 고려할 필요가 있다.

결론적으로, Cu는 대부분의 항만에서 항만 내부 농도가 인접 정점보다 유의하게 높게 나타났으며, Zn, Pb 및 Cd도 일부 항만에서 유의한 차이를 보여, 항만 내 해양 활동 또는 외부 유입원과의 연관 가능성을 시사하였다. 반면, Cr, Ni, Co 및 As는 대부분의 항만에서 유의한 차이를 보이지 않아, 해당 해역 내의 중금속 축적 특성은 금속별로 상이하게 나타남을 확인할 수 있었다.

### 3.3 인위적인 오염기원 구리의 유입 가능성

항만 지역에서 관측되는 구리(Cu) 오염은 다양한 인위적 기원에서 유입될 수 있다. 대표적인 오염원으로는 차량 브레이크 패드 마모(Jeong *et al.*[2022]), 타이어 마모입자(Wik and Dave[2009]; Jeong[2022]), 도로 표면 침전물, 도시 비점오염원(Birch and Scollen[2003]), 산업단지 배출수 등이 있다. 이러한 구리 함유 물질은 강우 시 우수 유출수를 통해 항만으로 유입되어 해저 퇴적물에 축적될 수 있다.

그러나 본 연구에서 분석한 결과, Cu는 대부분의 항만에서 인접

해역보다 통계적으로 유의하게 높은 농도를 보여(Fig. 3), 배후 유역으로부터의 기여 외에도 항만 내부의 국지적 오염원이 영향을 미쳤을 가능성을 시사한다. 이에 따라 퇴적물의 물리적 특성인 평균 입도와 Cu 농도 간의 상관성을 분석하였으며, 그 결과 모든 항만에서 뚜렷한 상관관계가 나타나지 않았다(Fig. 4). 이는 구리 오염이 자연적인 입도 분포나 퇴적 메커니즘보다는 다른 인위적 요인에 의한 영향 가능성을 나타낸다.

이러한 인위적 요인 중 하나로 주목되는 것은 선박 및 항만 구조물에 적용되는 방오도료이다. 방오도료는 선박 선체뿐만 아니라 부두, 부표, 양식장 설비 등에도 도포되며, 주요 방오성분인 구리는 해수와의 접촉을 통해 점진적으로 용출되어 주변 환경에 축적된다(Voulvoulis *et al.*[2002]; Valkirs *et al.*[2003]). 특히 해수 순환이 제한적인 폐쇄성 항만에서는 이러한 축적 현상이 더욱 심화될 수 있다. 용출된 구리는 해수 중  $1\text{--}6\mu\text{g/L}$  농도 수준에서도 해양 미세조류에 독성을 유발할 수 있는 것으로 보고되었다(Levy *et al.*[2007]; Ytreberg *et al.*[2010]).

본 연구에서는 이러한 방오도료 기인 구리의 오염 기여 가능성을 선박 통계 기반의 구리 용출량 추정을 통해 정량적으로 평가하였다.

### 3.4 항만별 선박 수, 톤수, 체류시간, 침수면적 및 구리 용출량 비교

본 연구에서는 선박 방오도료로부터의 구리 유입 가능성을 정량적으로 평가하기 위해, 2014년부터 2023년까지의 Port-MIS 선박

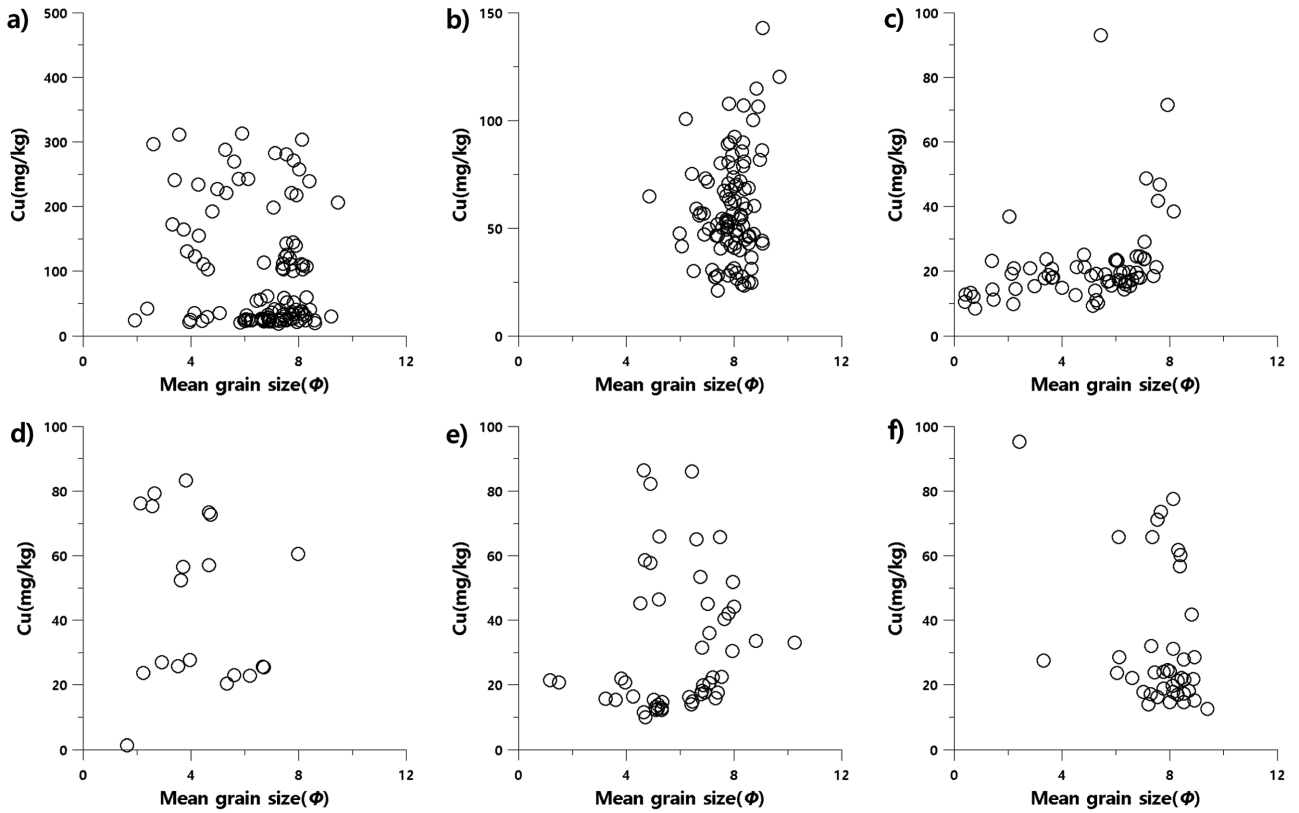


Fig. 4. Correlation between Mean grain size and Cu concentrations in Busan Port(a), Ulsan Port(b), Incheon Port(c), Donghae Port(d), Pohang Port(e), Mokpo Port(f).

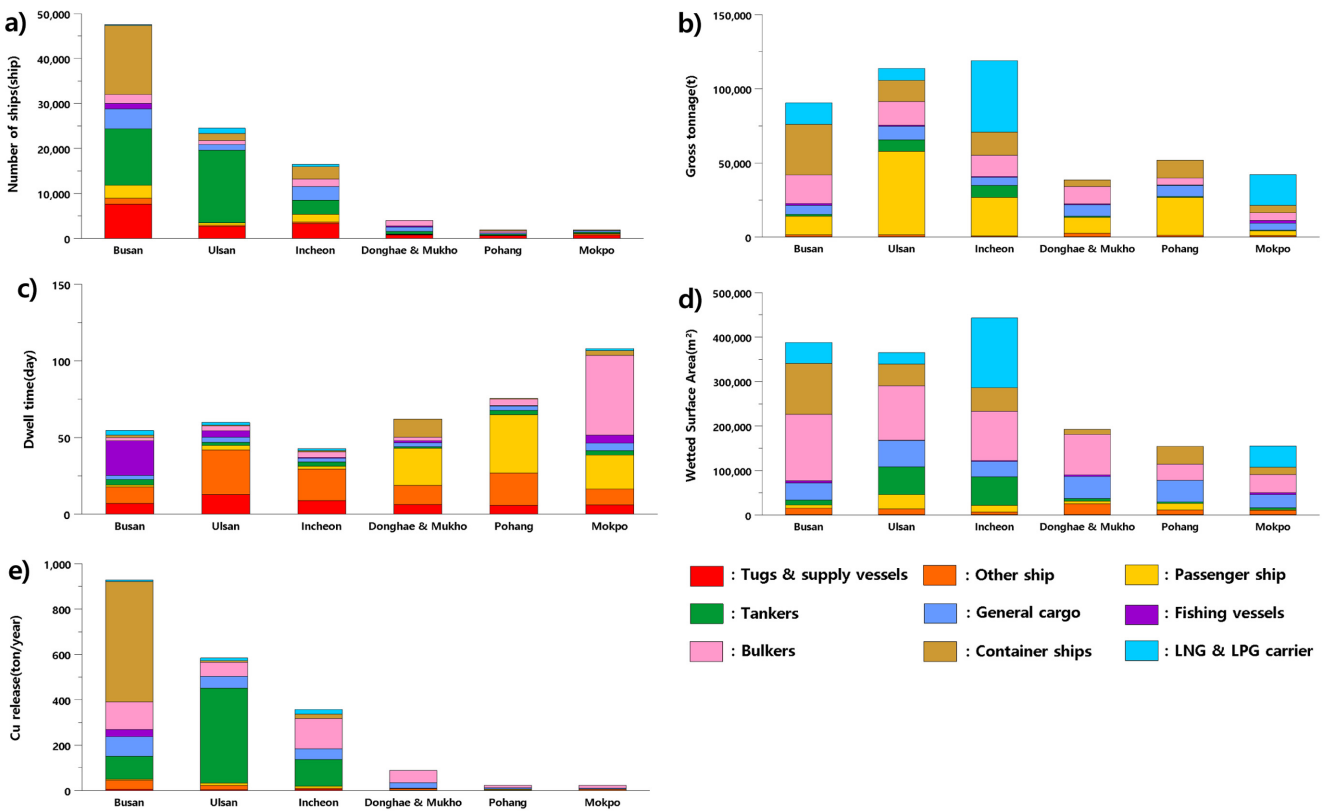


Fig. 5. Variation in the mean number of ships(a), gross tonnage(b), dwell time(c), wetted surface area(d), Cu release(e) during 2014-2023.

통계자료를 활용하여 6개 주요 무역항(부산항, 울산항, 인천항, 동해항, 포항항, 목포항)의 선박 수, 총톤수, 체류시간, 침수면적(Wetted Surface Area), 방오도로 기인 구리 용출량을 분석하였다(Fig. 5, Table 2).

선박 수는 부산항(47,577척)이 가장 많았고, 울산항과 인천항이 그 뒤를 이었으며, 동해항, 포항항, 목포항은 비교적 적은 수의 선박이 입항하였다(Fig. 5a). 총톤수는 인천항이 가장 높았고, 울산항과 부산항이 그 뒤를 차지하였다(Fig. 5b). 선박 체류시간은 목포항이 평균적으로 가장 길었고, 포항항, 동해항 순이었다(Fig. 5c). 침수면적은 인천항(442,992 m<sup>2</sup>)이 가장 넓었으며, 부산항과 울산항도 상대적으로 큰 값을 보였다(Fig. 5d).

방오도로 기인 구리 용출량은 부산항(1,122 ton/year)이 가장 많았으며, 울산항(726 ton/year), 인천항(452 ton/year) 순으로 높은 값을 보였다(Fig. 5e). 특히 부산항의 경우 컨테이너선, 벌크선, 탱커선 등의 입항 비중이 높고 체류 시간이 짧음에도 불구하고, 선박 수와 규모가 크기 때문에 용출량이 높게 나타난 것으로 판단된다. 울산항은 탱커선, 인천항은 탱커선, 벌크선 및 일반화물선이 주로 높은

기여를 하였다. 동해, 포항, 목포항의 경우 선박 수 자체가 적어 구리 용출량은 상대적으로 낮았다.

구리 용출량과 선박 관련 지표 간 상관관계를 분석한 결과, 선박 수와 구리 용출량 간의 결정계수( $r^2=0.99$ )는 매우 높았으며, 침수면적( $r^2=0.63$ ), 총톤수( $r^2=0.48$ ) 순으로 나타났다. 반면, 선박 체류시간은 구리 용출량과 뚜렷한 상관성을 보이지 않았다(Fig. 6). 이는 구리 오염에 있어 항만 내 선박 수와 선체 크기 등이 보다 직접적인 영향을 미침을 시사한다.

한편, 항만 내 구리 오염의 주요 기여원 중 하나로 지목되는 하천 유입 및 대기 침적에 의한 구리의 유입량은 일부 연구에서 정성적으로 제시된 바 있으나, 국내 항만별로 이를 정량화하여 선박 방오도로 기인 용출량과 직접 비교한 연구는 매우 제한적인 상황이다. 따라서 본 연구에서 제시된 방오도로 기반 구리 유입량은 기존에 간과되었던 오염원의 상대적 기여도를 평가하는 데 기초자료로 활용될 수 있으며, 향후에는 하천과 대기 기반 유입량과의 정량적 비교를 통한 종합적 오염원 기여 분석이 보완되어야 할 것으로 판단된다.

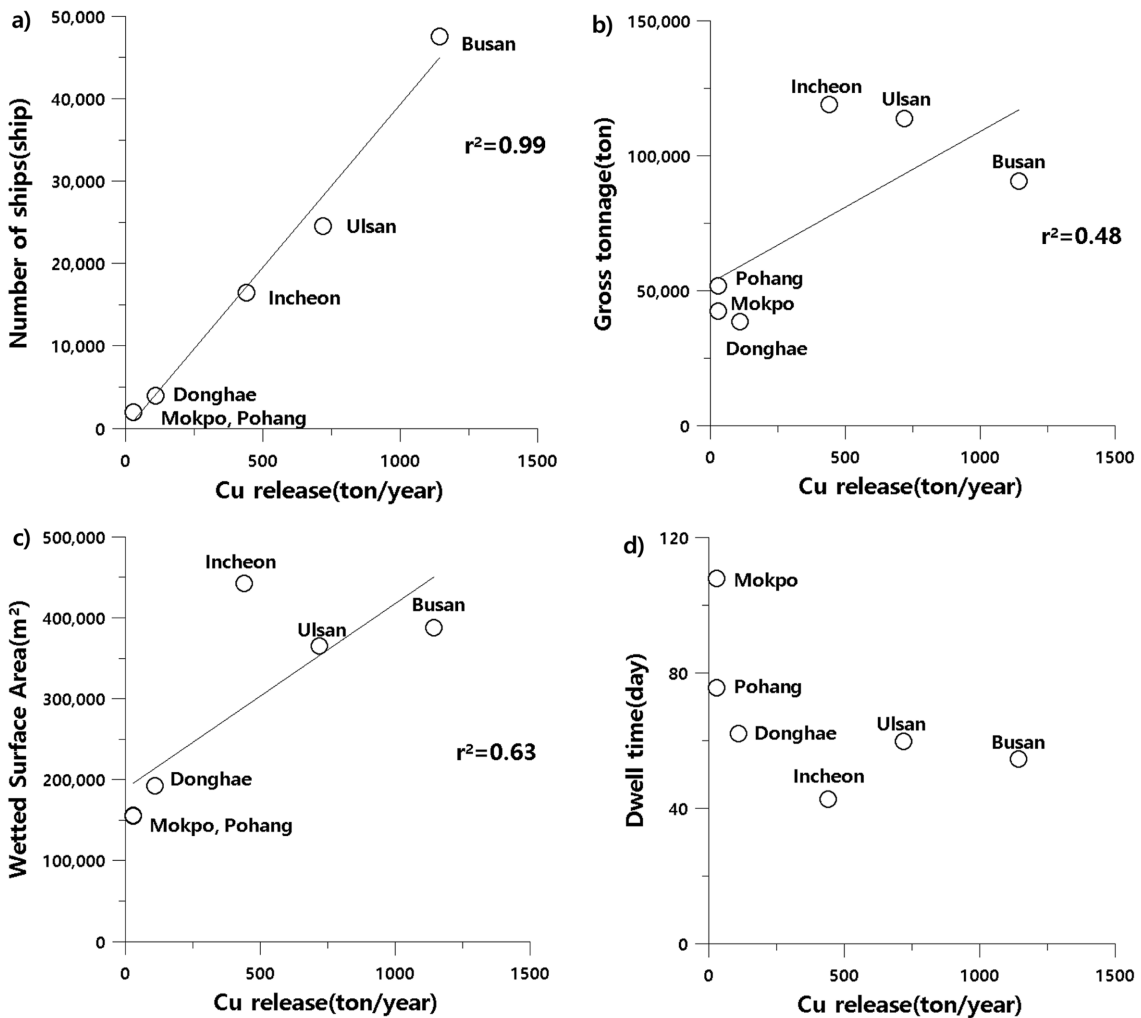


Fig. 6. Correlation between Cu release and number of ships(a), gross tonnage(b), wetted surface area(c), dwell time(e).

### 3.5 구리 용출량과 퇴적물 오염 간 상관관계 및 폐쇄도지수의 영향 평가

선박 방오도료에서 유래된 구리는 해수로의 직접적인 유입뿐만 아니라 해양 내 생지화학적 과정을 통해 최종적으로 퇴적물에 축적되는 특성이 있다(Wright and Mason[1999]). 이러한 특성은 방오도료 기인 오염의 평가에 있어 퇴적물 내 금속 농도가 중요한 지표가 될 수 있음을 시사한다. 본 절에서는 선박 방오도료로부터 유입된 구리의 용출량과 해수 및 퇴적물 내 구리 농도 간의 상관성을 분석함으로써, 구리의 주요 축적 매체를 규명하고자 하였다(Fig. 7). 또한, 항만의 지형적 폐쇄성을 나타내는 폐쇄도지수가 구리 및 중금속 오염에 미치는 영향을 함께 고찰하였다.

분석 결과, 해수 내 구리 농도는 구리 용출량과 뚜렷한 상관관계를 보이지 않았으며, 이는 구리가 해수 중에서 입자상 물질에 빠르게 흡착되어 이동하거나 침전되는 특성 때문으로 해석된다(Fang and Hong[1999]; Ra *et al.*[2013]). 반면, 퇴적물 내 구리 농도는 용출량과 비교적 양호한 상관관계( $r^2 = 0.57$ )를 보여, 선박 방오도료에서 유래된 구리가 해수를 경유하여 퇴적물에 장기적으로 축적되는 경향을 시사하였다. 이는 퇴적물이 중금속을 제거하는 필터 역할을 하며, 일부 연안 해역에서는 퇴적물 내 금속 농도가 시간이 지남에

따라 증가하는 반면 수층 농도는 안정되거나 감소할 수 있다는 기존 연구와도 부합한다(Choi *et al.*[2012]).

한편, 조사 대상 6개 항만의 폐쇄도지수를 산정한 결과(Table 7), 모두 1.0 이상의 값을 보여 International EMECS Center[2001] 기준에 따라 폐쇄성 해역으로 분류되었다. 폐쇄성 해역은 해수의 교환율이 낮아 외부로의 오염물질 배출이 제한되며, 이로 인해 구리를 포함한 오염물질의 체류 및 축적 가능성이 상대적으로 높다. 이러한 수리-지형적 특성은 항만 내 중금속의 장기적 축적을 유도하고, 특히 퇴적물에 그 영향이 더욱 뚜렷하게 나타날 수 있는 원인으로 작용할 수 있다.

다만, 인천항의 경우 실제로는 조석 간만의 차가 크고, 조류 흐름이 활발하여 비교적 개방적인 해역임에도 불구하고 본 연구에서 산정된 폐쇄도지수가 1 이상으로 나타난 것은 적용된 식이 수심과 해수 교환계수를 기반으로 하여 다소 일반화된 방식으로 계산되었기 때문이며, 특정 지역의 수리학적 특성을 완전히 반영하지 못할 수 있다. 따라서 폐쇄도지수는 정량적 참고지표로 활용하되, 해당 항만의 실제 유속, 해수유통, 조류 영향 등 현지 물리적 특성을 함께 고려하여 해석할 필요가 있다.

결론적으로, 선박 방오도료에서 유래된 구리는 해수보다 퇴적물에

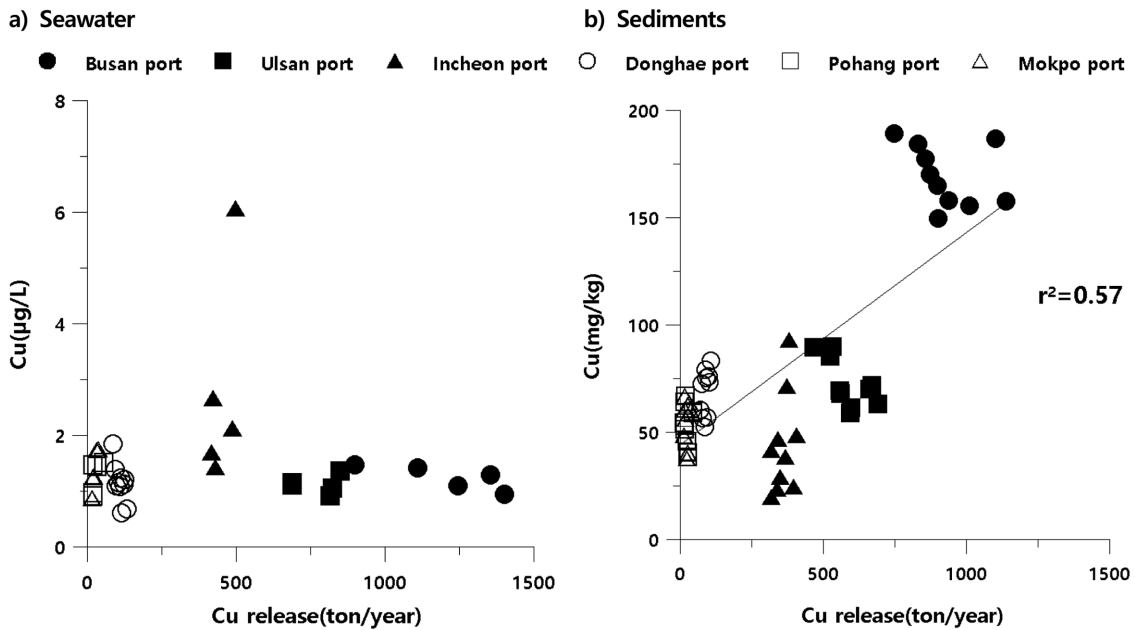


Fig. 7. Correlation between Cu release and Cu concentrations in seawater and sediments.

Table 7. Results of the Closure Index at each port

| Study region       | Bay area ( $r^2$ ) | Maximum depth (m) | Bay mouth width (km) | Bay mouth depth (m) | Closure Index |
|--------------------|--------------------|-------------------|----------------------|---------------------|---------------|
| Busan North Port   | 11.9               | 17.1              | 1.25                 | 19.1                | 2.5           |
| Ulsan Port         | 9.7                | 19.0              | 2.19                 | 18.5                | 1.5           |
| Incheon North Port | 3.2                | 12.7              | 1.28                 | 12.1                | 1.5           |
| Donghae Port       | 1.3                | 15.0              | 0.42                 | 13.0                | 3.1           |
| Pohang New Port    | 3.8                | 19.3              | 0.91                 | 20.6                | 2.0           |
| Mokpo Port         | 9.8                | 17.1              | 1.37                 | 18.1                | 2.2           |

더 많이 축적되며, 폐쇄성이 높은 항만 환경은 구리뿐 아니라 다양한 중금속의 장기 축적을 유도할 수 있다. 따라서 항만 내 중금속 오염 평가는 퇴적물 분석과 함께 지형, 수리 조건 등 항만 환경 전반의 공간적 특성을 종합적으로 고려할 필요가 있다.

**3.6 항만 내 중금속 오염에 영향을 미치는 주요 요인 분석**

앞서 언급한 바와 같이, 대부분의 항만에서 해수 및 퇴적물 내 중금속 농도는 인접 해역에 비해 높게 나타났으며, 특히 Cu, Zn, Pb 및 Cd는 선박 활동과 관련된 방오도로 유래 가능성이 있는 금속으로 지목되었다. 이 중 Cu는 선박 기반의 구리 용출량과의 정량적 비교를 통해 방오도로에서 기인한 축적 경향이 통계적으로 확인된 반면, Zn, Pb 및 Cd는 주요 배출원과의 뚜렷한 인과 관계가 확인되지 않았다. 이에 본 절에서는 항만 내 중금속 오염의 기인 특성을 보다 정밀하게 파악하기 위하여, 선박 활동, 항만의 지형적 특성(폐쇄도지수), 퇴적물 내 금속 농도 간의 상관관계를 통계적으로 분석하였다. 분석에는 IBM SPSS Statistics 31.0 프로그램을 활용하였으며, 피어슨 상관분석을 통해 변수 간 환경적 연관성을 평가하고(Table 8), 요인분석을 통해 중금속 축적에 영향을 미치는 주요 요인을 도출하였다(Table 9).

피어슨 상관분석 결과, 구리 용출량은 선박 수( $r = 0.991$ ), 선박 침수면적(WSA,  $r = 0.798$ ), 총톤수( $r = 0.710$ )와 강한 양의 상관관계를 보여, 선박의 규모와 활동량이 증가할수록 방오도로를 통한 구리 용출이 증가함을 시사한다. 또한 퇴적물 내 Cu 농도 역시 구리 용출량과 유의한 양의 상관관계( $r = 0.826$ )를 보였으며, 이는 선박 기인 구리가 해수를 매개로 퇴적물에 축적되고 있음을 뒷받침한다. 이와 같은 상관관계는 본 연구의 주요 가설인 '선박 활동 → 구리 용출 → 퇴적물 축적'이라는 인과 경로를 통계적으로 뒷받침하며, 방오도로 기인 구리 오염의 누적 과정을 통계적으로 입증한다.

반면, 폐쇄도지수는 Cu 용출량과는 낮은 상관성을 보였으나( $r =$

**Table 9.** Classification of source types by factor analysis

|                    | Factor1 | Factor2 | Factor3 |
|--------------------|---------|---------|---------|
| Cu leaching amount | 0.957   |         |         |
| No. of ships       | 0.938   |         |         |
| Gross tonnage      | 0.780   | -0.495  |         |
| Dwell time         | -0.784  |         |         |
| WSA                | 0.859   | -0.357  |         |
| Closure Index      |         | 0.878   |         |
| Cu                 | 0.753   | 0.304   |         |
| Zn                 |         | 0.978   |         |
| Pb                 | 0.310   | 0.927   |         |
| Cd                 |         | 0.926   |         |
| Cr                 | -0.399  |         | -0.823  |
| Ni                 |         |         | 0.982   |
| Co                 |         |         | 0.900   |
| As                 |         | 0.801   |         |
| % of variance      | 33.3%   | 33.0%   | 18.4%   |
| Cumulative %       | 33.3%   | 66.3%   | 84.6%   |

-0.161), Zn, Pb, Cd 등 일부 중금속과는 유의한 양의 상관관계가 나타났다(Zn:  $r = 0.830$ , Pb:  $r = 0.759$ , Cd:  $r = 0.726$ ). 이는 해수 교환이 제한되는 항만 구조에서 비점오염원이나 배후지역 유입물질이 쉽게 배출되지 못하고 체류·축적될 수 있음을 의미하며, 폐쇄성이 중금속의 축적을 증폭시키는 물리적 요인으로 작용함을 시사한다.

요인분석 결과, 고유값(Eigenvalue) 1 이상 기준에 따라 총 3개의 요인이 도출되었으며, 이들 요인의 누적 설명력은 84.7%로 나타났다. 제1요인은 선박 수, 총톤수, WSA, Cu 용출량, 퇴적물 내 Cu 농도의 높은 적재값을 보여, 선박 활동에 따른 방오도로 기인 Cu 오염을 설명하는 인위적 요인으로 해석된다. 제2요인은 폐쇄도지수와 Zn, Pb, Cd, As의 높은 적재값으로 구성되었으며, 항만 구조와 배후 비점오염원 등 복합적인 환경요인에 의한 오염 특성을

**Table 8.** Pearson correlation matrix between Cu leaching amount and influencing parameters

|                    | Cu leaching amount | No. of ships | Gross tonnage | Dwell time | WSA    | Closure Index | Cu     | Zn      | Pb     | Cd     | Cr      | Ni     | Co     | As    |
|--------------------|--------------------|--------------|---------------|------------|--------|---------------|--------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|-------|
| Cu leaching amount | 1.000              |              |               |            |        |               |        |         |        |        |         |        |        |       |
| No. of ships       | 0.991**            | 1.000        |               |            |        |               |        |         |        |        |         |        |        |       |
| Gross tonnage      | 0.710              | 0.641        | 1.000         |            |        |               |        |         |        |        |         |        |        |       |
| Dwell time         | -0.576             | -0.532       | -0.744        | 1.000      |        |               |        |         |        |        |         |        |        |       |
| WSA                | 0.798              | 0.754        | 0.947**       | -0.790     | 1.000  |               |        |         |        |        |         |        |        |       |
| Closure Index      | -0.161             | -0.087       | -0.704        | 0.177      | -0.485 | 1.000         |        |         |        |        |         |        |        |       |
| Cu                 | 0.826*             | 0.879*       | 0.216         | -0.313     | 0.386  | 0.346         | 1.000  |         |        |        |         |        |        |       |
| Zn                 | -0.127             | -0.116       | -0.428        | -0.212     | -0.285 | 0.830*        | 0.187  | 1.000   |        |        |         |        |        |       |
| Pb                 | 0.248              | 0.287        | -0.289        | -0.276     | -0.125 | 0.821*        | 0.619  | 0.871*  | 1.000  |        |         |        |        |       |
| Cd                 | -0.261             | -0.272       | -0.414        | -0.212     | -0.328 | 0.717         | -0.012 | 0.974** | 0.762  | 1.000  |         |        |        |       |
| Cr                 | -0.435             | -0.351       | -0.408        | 0.313      | -0.468 | 0.045         | -0.146 | -0.209  | -0.113 | -0.208 | 1.000   |        |        |       |
| Ni                 | 0.178              | 0.127        | 0.195         | 0.098      | 0.290  | -0.092        | -0.073 | -0.095  | -0.251 | -0.110 | -0.819* | 1.000  |        |       |
| Co                 | -0.053             | -0.046       | -0.160        | 0.226      | 0.050  | 0.287         | -0.066 | 0.116   | -0.077 | 0.055  | -0.533  | 0.852* | 1.000  |       |
| As                 | -0.165             | -0.211       | -0.301        | -0.118     | -0.353 | 0.459         | -0.012 | 0.791   | 0.654  | 0.855* | -0.286  | -0.142 | -0.219 | 1.000 |

\*Correlation is significant at the 0.05 level(2-tailed)

\*\*Correlation is significant at the 0.01 level(2-tailed)

반영하는 것으로 해석된다. 제3요인은 Cr, Ni, Co의 적재값이 높았으며, 이는 항만 내 직접적인 선박 활동이나 지형 특성과는 관련이 낮아 비항만적인 기원의 영향을 반영하는 요인으로 해석된다. 대부분 변수의 공동성(communalities)이 0.8 이상으로 나타나, 도출된 요인들이 전체 변수 분산을 안정적으로 설명하고 있음을 확인할 수 있었다.

결과적으로, Cu는 방오도로 유래의 주요 오염원으로 식별되었으며, Zn, Pb 및 Cd는 폐쇄도 및 배후 유역의 비점오염 등 복합적인 환경요인의 영향을 받는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 서론에서 제기한 연구 필요성과 부합하며, 항만 내 중금속 오염 특성을 평가할 때 단일 오염원보다는 선박 활동, 항만의 구조적 특성, 비항만 기원 등 다양한 요인을 고려한 통합적 접근이 필요함을 시사한다.

#### 4. 결 론

본 연구는 6개 주요 무역항(부산항, 울산항, 인천항, 동해항, 포항항, 목포항)을 대상으로 선박 방오도로에서 유래된 구리의 연간 용출량을 정량적으로 산정하고, 이를 해양환경측정망 자료와 비교함으로써 항만 내 금속 오염 특성을 평가하였다. 구리 용출량은 선박 수, 침수면적, 총톤수 등과 밀접한 상관성을 보였으며, 부산항이 가장 높은 수치를 나타내었다.

해수 및 퇴적물 내 구리 농도는 대부분의 항만에서 인접 해역보다 높았으며, 퇴적물 내 구리는 평균입도와와의 상관성은 낮고, 구리 용출량과는 유의한 양의 상관관계를 보여 방오도로에서 유래된 구리가 퇴적물에 축적되고 있음을 시사하였다. 더불어, 모든 항만이 폐쇄도지수 기준으로 폐쇄성 해역에 해당하여, 금속의 체류와 축적에 유리한 환경적 특성도 확인되었다.

이와 함께 본 연구에서는 Cu 외에도 Zn, Pb, Cd, Cr, Ni, Co 등 주요 중금속의 농도 분포를 분석하였고, 통계분석을 통해 각 금속의 기원 특성을 유형별로 분류하였다. 구리는 선박 활동과 관련된 인위적 기원으로, Zn, Pb, Cd는 항만의 폐쇄도와 주변 비점오염원이 복합적으로 작용한 결과로, Cr, Ni, Co는 비항만적 기원으로 해석되었다.

이러한 결과는 항만 내 중금속 오염이 단일 원인이 아닌 다양한 인위적·환경적 요인의 상호작용에 의해 발생함을 보여주며, 특히 구리는 방오도로에서 유래된 명확한 오염원임이 통계적으로 확인되었다. 본 연구는 항만별 선박 방오도로 기인 구리 오염에 대한 최초의 정량적 평가로서, 항만 환경 중금속 오염의 원인 규명에 있어 중요한 기반 자료를 제공한다는 데 의의가 있다.

다만 본 연구는 선박 방오도로 기인 구리 오염에 중점을 두어 수행되었기 때문에 항만 배후의 산업단지, 도시 비점오염원, 하천 유입 등 다양한 오염원의 기여도는 다루지 못하였다. 따라서 향후 연구에서는 항만별 주요 오염원의 정량적 기여도를 구체적으로 비교하고, 중금속별로 기인 요인을 통합적으로 분석할 수 있는 모델링 기반 연구가 병행될 필요가 있다.

결론적으로, 항만 내 중금속 오염의 실효성 있는 해석과 저감 대책 수립을 위해서는 선박 활동, 항만 구조, 외부 유역 특성을 포괄한 다요인 기반의 통합적 접근이 필수적이며, 본 연구는 그에 대한 과학적 근거를 제공하는 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

#### 후 기

본 연구는 2024년 정부(해양수산부)의 재원으로 해양수산과학기술진흥원-해양유해물질오염원 추적기법개발 사업 지원을 받아 수행되었습니다(KIMST-20220534). 또한, 본 연구에서 사용한 자료를 제공해 준 해양환경공단(KOEM)에 감사를 드립니다.

#### References

- [1] Baek, S.H., Lee, I.S., Choi, M.K., Lee, B.H., Hwang, D.W., Kim, S.Y. and Choi, H.G., 2013, Concentration and distribution patterns of PCDDs, PCDFs, DL-PCBs, PBDEs in sediment from Ulsan Bay, *The Sea*, 18, 186-194.
- [2] Birch, G.F. and Scollen, A., 2003, Sediment-bound heavy metals as indicators of human influence and biological risk in coastal water bodies, *ICES J. Mar. Sci.*, 60(1), 153-161.
- [3] Berechman, J. and Tseng, P.H., 2012, Estimating the environmental costs of port related emissions: The case of Kaohsiung, *Transp. Res., Part D*, 17, 35-38.
- [4] Choi, K.Y., Kim, S.H., Hong, G.H. and Chon, H.T., 2012, Distributions of heavy metals in the sediments of South Korean harbors, *Environ. Geochem. Health*, 34, 71-82.
- [5] Claisse, D. and Alzieu, Cl., 1993, Copper contamination as a result of antifouling paint regulations?, *Mar. Pollut. Bull.*, 26(7), 395-397.
- [6] Cresswell, T., Richards, J.P., Glegg, G.A. and Readman, J.W., 2006, The impact of legislation on the usage and environmental concentrations of Irgarol 1051 in UK coastal waters, *Mar. Pollut. Bull.*, 52, 1169-1175.
- [7] Fang, T.H. and Hong, E., 1999, Mechanisms influencing the spatial distribution of trace metals in surficial sediments off the south-western Taiwan, *Mar. Pollut. Bull.*, 38, 1026-1037.
- [8] Förstner, U. and Wittmann, G.T.W., 1981, *Metal Pollution in the Aquatic Environment*. Springer, Berlin Heidelberg.
- [9] Hearin, J.K.Z., Hunsucker, G., Swain, A., Stephens, H., Gardner, K. and Lieberman Harper M., 2015, Analysis of long-term mechanical grooming on large-scale test panels coated with an antifouling and a fouling-release coating, *Biofouling*, 31(8), 625-638.
- [10] Hwang, D.W., Lee, I.S., Choi, M.K. and Choi, H.G., 2014, Distribution and Pollution Assessment of Organic Matter and Trace Metals in Surface Sediment around Ulsan Harbor, *J. Korean Soc. Environ. Anal.*, 17(3), 146-160.
- [11] IBM Corp., 2023, *IBM SPSS Statistics for Windows, Version 31.0*. Armonk, NY: IBM Corp.

- [12] International Concentration on the control of harmful antifouling systems (AES) on ship, 2001 Edition, IMO, London, 69.
- [13] International EMECS Center, 2001, Environmental Guidebook on the Enclosed Coastal Seas of Japan(88 sea areas), 1-177.
- [14] Jalkanen, J.P., Johansson, L., Wilewska-Bien, M., Granhag, L., Ytreberg, E., Yngsell, E.K.M., Hasselov, D., Magnusson, I.M., Raudsepp, K., Maljutenko, U., Styhre, I., Winnes, L. and Moldanova, H.J., 2021, Modeling of discharges from Baltic sea shipping. *Ocean Sci.*, discuss 17, 699-728.
- [15] Jeong, H.R., 2022, Characteristics of heavy metal emissions from tire wear particles and the influence of rainfall on the release of heavy metals in road dust, *Environ. Anal. Health Toxicol.*, 37(4).
- [16] Jeong, H.R., Ryu, J.S. and Ra, K.T., 2022, Characteristics of potentially toxic elements and multi-isotope signatures (Cu, Zn, Pb) in non-exhaust traffic emission sources, *Environ. Pollut.*, 292.
- [17] Kim, K.T., Ra, G.T., Kim, J.K., Kim, E.S., Kim, C.K. and Shim, W.J., 2015, Distribution of Dissolved Heavy Metals in Surface Seawaters Around a Shipyard in Gohyun Bay, Korea, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 18(1), 36-44.
- [18] Kim, N.S., Kang, H., Kwon, M.S., Jang, H.S. and Kim, J.G., 2016, Comparison of Seawater Exchange Rate of Small Scale Inner Bays within Jinhae Bay, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 19(1), 74-85.
- [19] Kim, S.B., Lee, J.Y. and Jang, B.K., 1996, Some heavy metal concentrations of seawater and *Mytilus coruscus* in Ulsan sea-side, *Korean J. Rural Med.* 21, 85-95.
- [20] Korea Hydrographic and Oceanographic Agency (KHOA). Open Ocean Data Platform: Port water depth data. <https://www.khoa.go.kr/oceangrid/>, (accessed 2024.07.18.)
- [21] Levy, J.L., Stauber, J.L. and Jolly, D.F., 2007, Sensitivity of marine microalgae to copper: The effect of biotic factors on copper adsorption and toxicity. *Sci. Total Environ.*, 387, 141-154.
- [22] NIFS (National Institute of Fisheries Science), 2023. Korean Standard Method for Marine Environment, MOF Notification, No. 2023-5.
- [23] MOF (Ministry of Oceans and Fisheries). Port Management Information System (PORT-MIS), <https://www.portmis.go.kr/>, (accessed 2024.05.01.)
- [24] Moser, C.S., Wier, T.P., Grant, J.F., First, M.R., Tamburri, M.N., Ruiz, G.M., Miller, A.W. and Drake, L.A., 2016, Quantifying the total wetted surface area of the world fleet: a first step in determining the potential extent of ships' biofouling, *Biol. Invasions*, 18, 265-277.
- [25] Nimmo, D.R. and Hamaker T.L., 1982, Mysids in toxicity testing a review, In *Ecology of Mysidacea*, Springer, Dordrecht, 171-178.
- [26] Paik, B.G., Kim, K.Y., Cho, S.R., Ahn, J.W., Cho, S.R., Kim, K.R. and Chung, Y.U., 2013, Study on the Drag Performance of the Flat Plates Treated by Antifouling Paints, *J. Soc. Nav. Archit. Korea*, 50(6), 399-406.
- [27] QGIS (3.10.9). <https://www.qgis.org/ko/site>, (accessed 2024.08.01.)
- [28] Ra, K.T., Kim, E.S., Kim, K.T., Kim, J.K., Lee, J.M. and Choi, J.Y., 2013, Assessment of heavy metal contamination and ins ecological risk in ther surface sediment along the coast of Korea, *J. Costal Res.*, 65, 105-110.
- [29] Schiff, K., Diehl, D. and Aldis, V., 2004, Copper emissions from antifouling paint on recreational vessels, *Mar. Pollut. Bull.*, 48, 371-377.
- [30] Schiff, K., Brown, J., Diehl, D. and Greenstein, D., 2007, Extent and magnitude of copper contamination in marinas of the San Diego region, California, USA, *Mar. Pollut. Bull.*, 54, 322-328.
- [31] Turner, A., 2010, Marine pollution from antifouling paint particles. *Mar. Pollut. Bull.* 60, 159-171.
- [32] Turner, A., 2014, Mobilisation and bioaccessibility of lead in paint from abandoned boats. *Mar. Pollut. Bull.* 89, 35-39.
- [33] Valkirs, A.O., Seligman, P.F., Hasbeck, E. and Caso, J.S., 2003, Measurement of copper release rates from antifouling paint under laboratory and in situ conditions: implications for loading estimation to marine water bodies. *Mar. Pollut. Bull.* 46, 763-779.
- [34] Voulvoulis, N., Scrimshaw, M.D. and Lester, J.N., 2002, Comparative environmental assessment of biocides used in antifouling paints. *Chemosphere*, 47, 789-795.
- [35] Wik, A. and Dave, G., 2009, Occurrence and effects of tire wear particles in the environment – A critical review and an initial risk assessment, *Environ. Pollut.*, 157, 1-11.
- [36] Wright, P. and Mason, C.F., 1999, Spatial and seasonal variation in heavy metals in the sediments and biota of two adjacent estuaries, *Sci. Total Environ.*, 226, 139-156.
- [37] Yau, P.S., Lee, S.C., Cheng, Y., Huang, Y., Lai, S.C. and Xu, X.H., 2013, Contribution of ship emissions to the fine particulate in the community near and international port in Hong Kong, *Atmos. Res.*, 124, 61-72.
- [38] Ytreberg, E., Karlsson, J. and Eklund, B., 2010, Comparison of toxicity and release rates of Cu and Zn from anti-fouling paints leached in natural and artificial brackish seawater. *Sci. Total Environ.*, 408, 2459-2465.

---

Received 12 September 2024

1st Revised 4 November 2024, 2nd Revised 18 August 2025

Accepted 19 August 2025