

화산재 기원 토양에서 유래된 제주도 하천 퇴적물 오염 평가

봉기문 · 양해종 · 강태우[†] · 한종학 · 정호진 · 양원준 · 정희정 · 황순홍 · 김경현

국립환경과학원 영산강물환경연구소

Assessment of Riverbed Sediments Originated from Volcanic Ash Soils in Jeju Island

Ki Moon Bong, Hae Jong Yang, Tae-Woo Kang[†], Jong Hak Han, Hyo Jin Jeong, Won Jun Yang, Heejung Jung, Soon Hong Hwang, and Kyunghyun Kim

Yeongsan River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research, Gwangju, 61011, Korea

Received October 11, 2019 / Accepted November 19, 2019

The pollution of riverbed sediments originating from soils derived from volcanic ash on Jeju Island was assessed. Organic matter (IL), nutrients (TN, TP), and heavy metals (Pb, Zn, Cu, Cd, Hg, As, Cr, Ni) in the sampled sediments were analyzed, and the pollution status was assessed to identify whether it is of anthropogenic or natural origin. The pollution levels for the parameters were determined as Class IV for TP and Class II for Hg, Cr, and Ni. The pollution status of two out of three sampling stations exhibited Very Poor status, due to high TP content. The third site was noted to have a Fair status because of the measure Class II Cr and Ni pollution levels. The TP, Cr, and Ni levels of the Jeju Island river sediments were compared with measurements from previous studies, which showed that these levels are similar to those found in original volcanic ash soils. This implies that the high levels of the pollutants are attributed to soils originating from natural volcanic activity. Therefore, the river sediments originating from Jeju Island must be assessed using different criteria that reflect the unique geological characteristics of the Jeju soils.

Key words: Surface sediments, Sediment pollution assessment, Jeju Island, Volcanic ash soils

1. 서 론

환경 중에 존재하는 오염물질들은 다양한 경로를 통해 하천으로 유입된 후 침전되어 최종적으로 퇴적물에 축적된다. 퇴적물에 축적된 오염물질들은 퇴적물에 서식하는 저서생물뿐만 아니라 수생태계 건강성에 영향을 주게 되며, 하천의 물리화학적 조건에 따라 수중으로 용출되거나 재결합하는 과정을 거쳐 수질의 변화를 초래한다.^{1,2)} 또한 퇴적물은 물과 생물체와 다르게 해당 지역의 오염에 대한 역사가 잘 반영되어 확인할 수 있기 때문에 하천의 수질 및 생태계 관리에 중요한 역할을 한다.³⁾

최근에 우리나라에서는 4대강 살리기 사업의 일환으

로 분류 하도를 횡단하는 다기능 보가 축조되었다. 이로 인하여 하천의 물리적 환경 변화가 발생하여 수심이 깊어지고 흐름이 지체됨으로써 유량과 유속 등이 감소되어 체류시간이 증가되었다. 또한, 정체된 수역 내에는 퇴적물의 세립화가 이루어져 하천 퇴적물의 극심한 변화가 발생되고 있다.⁴⁾ 따라서, 국립환경과학원에서는 퇴적물의 환경질 현황조사 및 평가를 위해 2012년부터 퇴적물측정망에 대한 물환경측정망 운영계획을 수립하였다. 퇴적물측정망은 하천·호소에 대한 표층 퇴적물의 유기물, 영양염류 및 금속류 등 다양한 항목들을 조사하고, “하천·호소 퇴적물 오염평가 기준”에 적용하여 퇴적물의 항목별 및 지점별 오염도를 평가하고 있다.⁵⁾

[†]To whom correspondence should be addressed.

Tel: 82-62-970-3990, Fax: 82-62-970-3999, E-mail: kangtw@korea.kr

퇴적물 오염은 대부분 산업폐수, 광산업, 농업, 생활하수 등 인위적인 활동뿐만 아니라 하천 주변의 토양 침식과 암석의 풍화작용 등의 자연적인 영향과 매우 밀접한 관계가 있는 것으로 알려졌다. 특히, 제주도 토양은 화산섬의 전형적인 화산재 특성을 보유하고 있어 자연적인 유입원에 의해 자체적으로 금속류 함량이 높다고 보고되었다.⁶⁾ 제주도 토양오염측정망 운영 결과에서도 금속류 항목들 중 Ni 함량이 토양오염 우려 기준을 초과하는 결과가 나타나 정밀조사를 통해 화산회 토양의 자연 함유량에서 기인한다고 하였다.^{7,8)} 또한 화산재 기원의 일본, 미국 하와이 및 프랑스 La Reunion 지역의 토양에서도 일반 토양보다 Cu, Cr, Ni, Zn 등의 금속류 함량이 매우 높다고 하였다.⁹⁻¹¹⁾ 이러한 화산재 기원 토양으로부터 유래된 하천 퇴적물은 조사지역의 지질학적 특성과 관련이 있기 때문에 퇴적물의 오염도 평가시 고려할 필요가 있다

따라서, 본 연구는 제주도 하천 퇴적물 중 유기물, 영양염류 및 금속류 항목들의 함량을 분석하였고, 이들로부터 항목별 및 지점별로 오염도를 평가하여 인위적 또는 자연적 영향 여부를 파악하였다. 또한, 제주도 하천 퇴적물은 전형적인 화산재 기원의 토양과 밀접한 관계가 있을 것으로 생각되어 국내의 선행 연구들에 의한 토양과 퇴적물들의 결과와 비교하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 조사 지점 및 분석 방법

조사 지점은 제주 하천의 표층 퇴적물을 채취하기 위해 옹포천(OP), 동홍천(DH) 및 외도천(OD) 3개 지점을 선정하였다. 조사 시기는 2015년부터 2018년까지 3년간 매년 상반기(4월)와 하반기(10월)에 연 2회 수행하였다. 표층 퇴적물 시료는 각 지점으로부터 5곳 이상을 선정하여 스테인리스 재질의 스크프(scoop)으로 채취하였다. 채취한 시료는 대표성을 갖도록 균질화 시킨 다음 2 mm 체를 통과시켜 유기물 및 영양염류 분석용으로 사용하였고, 비금속 나일론(nylon) 재질의 0.15 mm 체를 통과시킨 시료는 금속류 분석용으로 사용하였다. 체질이 완료된 퇴적물 시료는 잘 밀봉한 후 즉시 실험실로 이동하여 분석 전까지 5°C에서 냉장 보관하였다. 전처리 및 분석은 수질오염공정시험기준-퇴적물에 따라 수행하였고, 분석 항목은 유기물(Ignition Loss, IL), 영양염류(TN, TP) 및 8종의 금속류(Pb, Zn, Cu, Cd, Hg, As, Cr, Ni)를 분석하였다(ES 04852.1, ES 04862.1,

ES 04863.1, ES 04870-04878).¹²⁾

2.2. 하천 퇴적물 오염 평가

퇴적물의 오염 평가 방법은 환경부 국립환경과학원에 의한 “하천·호소 퇴적물 오염평가 기준”을 사용하였다.¹³⁾ 유기물 및 영양염류의 항목별 평가는 IL 함량이 13% 이상, TN 함량이 5,600 mg/kg 이상, TP 함량이 1,600 mg/kg 이상일 때 IV 등급으로 심각하고 명백한 오염 상태를 나타낸다. 8종의 금속류들은 Pb, Zn, Cu, Cd, Hg, As, Cr 및 Ni 함량이 저서생물에 대한 독성 영향에 따라 I, II, III 및 IV 등급의 4단계로 평가된다. I 등급은 독성이 나타날 가능성 거의 없는 상태, II 등급은 독성이 나타날 가능성 있는 상태, III 등급은 독성이 나타날 가능성 비교적 높은 상태, IV 등급은 독성이 나타날 가능성 매우 높은 상태를 의미한다 (Table 1).

채취 지점별 오염 평가 기준은 각 항목별로 평가된 등급을 종합적으로 고려하여 보통, 약간 나쁨, 나쁨 및 매우 나쁨의 4단계로 퇴적물의 오염 상태를 나타낸다 (Table 2). 보통 단계는 금속류 8개 항목들이 모두 I 등급, 약간 나쁨 단계는 금속류 8개 항목들 중 II 등급 또는 III 등급 항목이 1개 이상, 나쁨 단계는 금속류 II 등급 기준 지수가 0.34이상, 매우 나쁨 단계는 IV 등급 항목이 1개 이상일 때 구분한다. 금속류 II 등급 기준 지수는 아래 식에 의해 산출한다.

$$\text{금속류 'II' 등급 기준 지수} = \frac{\sum_{i=0}^8 \left(\frac{EC_i}{PEL_{Ki}} \right)}{8}$$

여기서, EC_i 는 금속류 항목별 농도들이며, PEL_{Ki} 는 금속류 항목별 II 등급 기준값이다.

단계별 퇴적물 채취 지점의 상태 및 조치에 대해 살펴보면, 보통 단계는 지질이나 대기의 영향을 일반적인 정도로 받는 곳에서 나타나는 상태이고, 약간 나쁨 단계는 저서생물에 독성 가능성이 나타날 수 있어 독성 시험을 통해 악영향 확인이 필요함을 의미한다. 나쁨 단계는 저서생물에 독성 가능성이 높아 조사 지점 범위를 상하류로 확대하여 오염 규모 확인이 필요한 상태이고, 매우 나쁨 단계는 심각하고 명백하게 오염되었으며 중장기적으로 배출시설 및 공공수역 관리가 필요함을 나타낸다. 또한, 한 지점에 대한 퇴적물 오염 단계가 중복되어 평가될 경우는 오염도가 높은 단계로 평가한다.

Table 1. Sediment pollution assessment criteria for parameters proposed by the National Institute of Environmental Research of Korea

| Class | | I | II | III | IV |
|--|------------|-------|--------|---------|---------|
| Organic matter & nutrients ¹⁾ | IL (%) | | - | | > 13 |
| | TN (mg/kg) | | - | | > 5,600 |
| | TP (mg/kg) | | - | | > 1,600 |
| Heavy metals ²⁾ (mg/kg) | Cu | ≤48 | ≤228 | ≤1890 | >1890 |
| | Pb | ≤59 | ≤154 | ≤459 | >459 |
| | Ni | ≤40 | ≤87.5 | ≤330 | >330 |
| | As | ≤15 | ≤44.7 | ≤92.1 | >92.1 |
| | Hg | ≤0.07 | ≤0.67 | ≤2.14 | >2.14 |
| | Zn | ≤363 | ≤1,170 | ≤13,000 | >13,000 |
| | Cd | ≤0.4 | ≤1.87 | ≤6.09 | >6.09 |
| Cr | ≤112 | ≤224 | ≤991 | >991 | |

*Class of sediment status

¹⁾Class IV: Status of sediment with serious and obvious pollution, ²⁾Class I: Status of sediment with almost no possibility toxicity on benthic organisms, Class II: Status of sediments with possible toxicity on benthic organisms, Class III: Status of sediments with possibility is relatively high toxicity on benthic organisms, Class IV: Status of sediments with very high possibility toxicity on benthic organisms.

Table 2. Sediment pollution assessment guidelines for monitoring stations proposed by the National Institute of Environmental Research of Korea

| Pollution stage | Assessment guidelines |
|-----------------|---|
| Good | All eight metals are Class I |
| Fair | At least one metal is Class II or III |
| Poor | mPEL _k Q ¹⁾ value of metals is higher than 0.34 |
| Very Poor | At least one parameter is Class IV |

¹⁾mean of PEL (probable effect level) quotient.

저서생물을 이용한 생태독성 평가는 (주)네오엔비즈에 의뢰하여 수행하였고, 표준 시험방법은 미국재료시험협회(ASTM, American Society of Testing Materials)의 독성시험법을 따랐다. 시험 생물은 미국 담수퇴적물 표준 독성 시험에 사용되는 저서생물인 *Hyaella azteca* 를 이용하였다. 생태독성 평가는 시험 대상 퇴적물에 저서생물을 10일간 배양·노출시킨 이후 생존과 사멸한 개체수를 확인하였고, 이를 t-검정(student's t-test) 또는 분산분석(ANOVA) 방법으로 대조구와 실험구의 생존율에 대해 통계적 유의한 차이를 평가하였다.¹⁴⁾

3. 결과 및 고찰

3.1. 하천 퇴적물 분석결과

제주도의 3개 하천을 대상으로 2016부터 2018년까지 3년 동안 조사된 표층 퇴적물 중 유기물(IL), 영양염류

(TN, TP) 및 금속류(8종 중금속) 함량을 분석하여 Table 3에 나타내었다.

제주도 3개 하천 퇴적물 중 IL, TN 및 TP의 평균 함량은 각각 1.67±0.85%, 403±310 mg/kg 및 1684±29 mg/kg으로 나타났고, 금속류 8종의 평균 함량은 각각 23.6±20.4 (Pb), 248±160 (Zn), 55.4±29.2(Cu), 0.309±0.157 (Cd), 0.116±0.135 (Hg), 7.03±1.76 (As), 122±61 (Cr) 및 60.0±26.1 mg/kg (Ni)으로 조사되었다. 특히, 동홍천 지점의 표층 퇴적물 중 금속류(Pb, Zn, Cu, Cd, Hg) 함량은 옹포천과 외도천 지점의 표층 퇴적물 보다 약 2.0-7.6배 정도 높았다. 이러한 금속류는 일반적으로 대표적인 오염형 금속으로 알려졌다^{15,16)}, 동홍천 지점의 주변과 상류로부터 토양 유실의 영향인지 또는 점오염원의 유입 때문인지 향후 정밀조사가 필요하다.

제주도 하천 퇴적물 중 IL, TN, TP 및 8종 금속류 함량은 국내 대표 4대강(한강, 낙동강, 금강, 영산강)의 하천 퇴적물 조사 결과와 비교 평가하였다(Fig. 1). 국내 대표 4대강의 하천 퇴적물 자료는 2016년부터 2017년까지 조사되어 환경부 물환경정보시스템에 공개된 것을 활용하였고(<http://water.nier.go.kr>), 이들 자료 중 산업단지 및 광산의 영향을 받아 오염이 의심되는 지점들은 제외하였다. 4대강 하천 퇴적물 중 IL, TN 및 TP 함량은 각각 1.74-2.98%, 813-1078 mg/kg, 253-531 mg/kg 범위였고, 8종의 금속류들의 함량은 각각

Table 3. Organic matter, nutrients, and heavy metals contents in the surface sediments of Jeju Island, 2016-2018

| Site | Sampling date | Organic matter & Nutrients | | | Heavy metals (mg/kg) | | | | | | | | | |
|---------|---------------|----------------------------|-------------|------------|----------------------|-----------|-----------|-------------|-------------|---------------|-----------|-----------|-----------|------|
| | | IL (%) | TN (mg/kg) | TP (mg/kg) | Pb | Zn | Cu | Cd | Hg | As | Cr | Ni | | |
| OP | 2016 | FH | 2.40 | 513 | 1343 | 13.0 | 105 | 36.0 | 0.220 | 0.0340 | 7.60 | 177 | 62.4 | |
| | | SH | 3.66 | 1143 | 1349 | 12.8 | 113 | 39.4 | 0.110 | 0.0380 | 5.50 | 196 | 92.4 | |
| | 2017 | FH | 2.81 | 1206 | 1370 | 14.6 | 99.3 | 38.1 | 0.150 | 0.0340 | 7.00 | 187 | 70.4 | |
| | | SH | 2.45 | 372 | 1457 | 13.8 | 141 | 40.2 | 0.330 | 0.0370 | 8.20 | 206 | 83.1 | |
| | 2018 | FH | 2.39 | 418 | 1207 | 15.9 | 145 | 39.5 | 0.230 | 0.0460 | 6.90 | 186 | 79.4 | |
| | | SH | 2.29 | 528 | 1297 | 13.1 | 143 | 36.3 | 0.270 | 0.0340 | 5.60 | 243 | 134 | |
| | Mean±SD | | 2.67±0.52 | 697±375 | 1337±83 | 13.9±1.2 | 125±21 | 38.3±1.8 | 0.218±0.080 | 0.0372±0.0047 | 6.80±1.08 | 199±24 | 87.0±25.3 | |
| | DH | 2016 | FH | 1.13 | 321 | 1722 | 57.6 | 394 | 87.1 | 0.340 | 0.145 | 7.20 | 69.5 | 38.3 |
| | | | SH | 1.08 | 288 | 1581 | 21.5 | 256 | 44.6 | 0.310 | 0.164 | 5.00 | 71.3 | 37.0 |
| | | 2017 | FH | 1.65 | 414 | 1961 | 59.9 | 461 | 87.8 | 0.340 | 0.255 | 7.90 | 117 | 58.7 |
| SH | | | 1.87 | 346 | 1939 | 49.9 | 597 | 107 | 0.640 | 0.305 | 10.8 | 104 | 50.8 | |
| 2018 | | FH | 1.49 | 204 | 1667 | 62.0 | 540 | 120 | 0.560 | 0.490 | 8.90 | 101 | 54.7 | |
| | | SH | 1.41 | 479 | 1546 | 41.8 | 426 | 92.8 | 0.620 | 0.297 | 8.30 | 93.3 | 47.4 | |
| Mean±SD | | 1.44±0.30 | 342±96 | 1736±177 | 48.8±15.3 | 446±119 | 89.9±25.6 | 0.468±0.154 | 0.276±0.124 | 8.02±1.92 | 92.6±18.8 | 47.8±8.7 | | |
| OD | | 2016 | FH | 0.720 | 182 | 1993 | 14.7 | 194 | 51.7 | 0.230 | 0.0500 | 7.10 | 49.6 | 21.5 |
| | | | SH | 0.680 | 144 | 1943 | 7.30 | 154 | 30.2 | 0.140 | 0.0340 | 4.90 | 74.2 | 46.5 |
| | | 2017 | FH | 1.31 | 269 | 2004 | 4.70 | 171 | 31.6 | 0.170 | 0.0110 | 8.30 | 123 | 75.2 |
| | SH | | 1.26 | 186 | 2126 | 8.90 | 169 | 44.8 | 0.390 | 0.0550 | 8.00 | 68.0 | 43.3 | |
| | 2018 | FH | 0.800 | 141 | 1949 | 10.6 | 201 | 46.3 | 0.220 | 0.0490 | 6.20 | 64.7 | 44.6 | |
| | | SH | 0.600 | 101 | 1855 | 1.90 | 151 | 24.6 | 0.290 | 0.0180 | 3.20 | 58.4 | 41.0 | |
| | Mean±SD | | 0.895±0.309 | 171±57 | 1978±89 | 8.02±4.50 | 173±21 | 38.2±10.8 | 0.240±0.090 | 0.0362±0.0183 | 6.28±1.95 | 72.9±25.7 | 45.4±17.2 | |
| | Mean±SD | | 1.67±0.85 | 403±310 | 1684±296 | 23.6±20.4 | 248±160 | 55.4±29.2 | 0.309±0.157 | 0.116±0.135 | 7.03±1.76 | 122±61 | 60.0±26.1 | |

FH: First half-year, SH: Second half-year.

30.7-35.9 (Pb), 137-192 (Zn), 24.6-40.0 (Cu), 0.283-0.378 (Cd), 0.048-0.058 (Hg), 8.05-9.68 (As), 55.3-68.3 (Cr) 및 20.3-29.1 mg/kg (Ni) 범위로 분포하였다.

본 연구 지점들의 표층 퇴적물 중 IL 및 TN 함량은 4대강 표층 퇴적물보다 낮거나 유사한 수준이었으나, TP 함량은 약 2.5-7.8배 정도 높았다. 그리고 8종의 금속류 함량들도(동홍천 제외) 대부분 IL 및 TN 함량과 마찬가지로 낮거나 유사한 반면 Cr 및 Ni 함량은 약 1.1-4.3배 정도 높은 특성을 보였다. 이러한 결과는 제주도 지역의 특이한 토양 특성과 밀접한 관계가 있을 것으로 판단되며 화산재 기원 TP, Cr 및 Ni 결과 부분에서 다시 논의하도록 하겠다. 특히 동홍천 지점의 경우, 8종의 금속류 함량들은 위에서 언급했듯이 제주도 지역 다른 하천들뿐만 아니라 4대강 표층 퇴적물들보다도 상대적으로 매우 높은 특성을 보였다. 이러한

결과를 통해 동홍천 지점의 표층 퇴적물은 제주도 지역의 특이한 토양 특성뿐만 아니라 유입된 오염원의 영향도 미쳤을 것이라 생각된다.

3.2. 하천 퇴적물 오염 평가

제주도의 3개 하천을 대상으로 2016년부터 2018년까지 3년 동안 조사된 표층 퇴적물 중 유기물(IL), 영양염류(TN, TP) 및 금속류(8종 중금속) 함량으로부터 항목별 및 지점별 오염도를 평가하여 Table 4에 나타내었다.

3년 동안 항목별로 오염도를 평가한 결과, IL 및 TN 함량은 모든 지점에서 IV 등급으로 평가되지 않았으나, TP 함량은 옹포천 지점에서 IV 등급 미만으로 평가된 반면 동홍천 및 외도천 지점에서 IV 등급으로 평가되었다. 금속류의 경우는 옹포천 지점에서 Cr과 Ni 함량, 동홍천 지점에서 Zn, Cu, Cd, Hg 및 Ni 함량 그리고

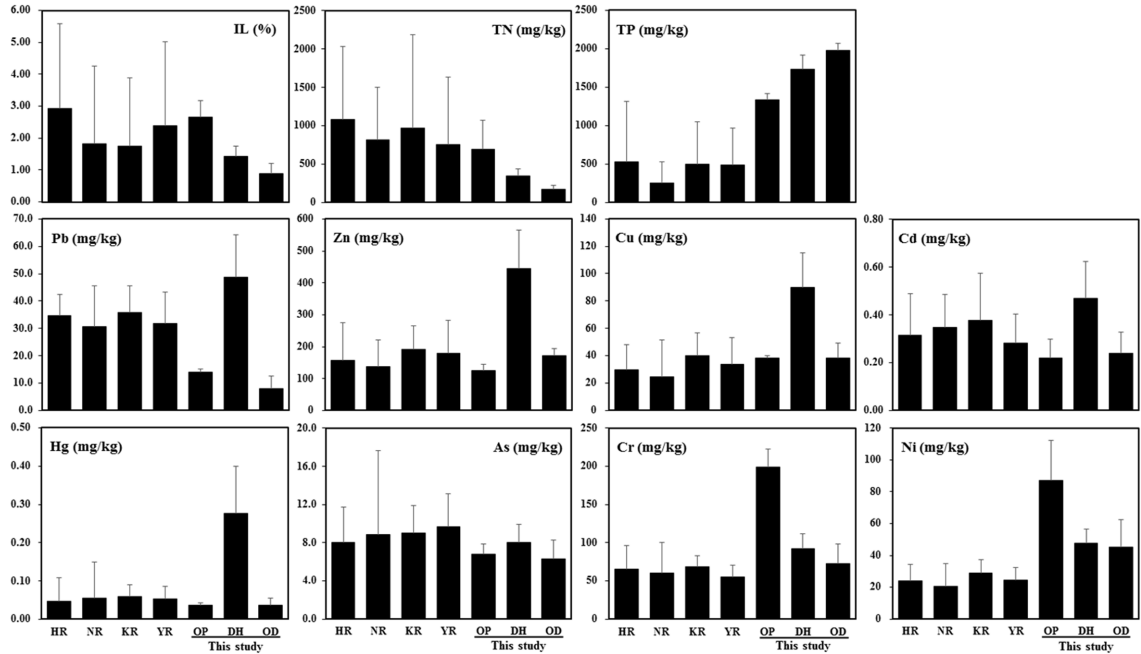


Fig. 1. Comparison of organic matter, nutrients, and heavy metals contents in the surface sediments of Jeju Island River and four major Rivers. (HR: Han River, NR: Nakdong River, KR: Keum River, YR: Yeongsan River)

Table 4. Pollution assessment from organic matter, nutrients, and heavy metals contents in the surface sediments of Jeju Island, 2016–2018

| Site | Sampling date | Organic matter & Nutrients | | | Heavy metals | | | | | | | | mPEL _k Q value | Pollution stage | |
|------|---------------|----------------------------|-----|-----|--------------|----|----|----|----|----|----|-----|---------------------------|-----------------|-----------|
| | | IL | TN | TP | Pb | Zn | Cu | Cd | Hg | As | Cr | Ni | | | |
| OP | 2016 | FH | <IV | <IV | <IV | I | I | I | I | I | I | II | II | 0.27 | Fair |
| | | SH | <IV | <IV | <IV | I | I | I | I | I | I | II | III | 0.31 | Fair |
| | 2017 | FH | <IV | <IV | <IV | I | I | I | I | I | I | II | II | 0.28 | Fair |
| | | SH | <IV | <IV | <IV | I | I | I | I | I | I | II | II | 0.33 | Fair |
| | 2018 | FH | <IV | <IV | <IV | I | I | I | I | I | I | II | II | 0.31 | Fair |
| | | SH | <IV | <IV | <IV | I | I | I | I | I | I | III | III | 0.41 | Poor |
| Mean | | <IV | <IV | <IV | I | I | I | I | I | I | II | II | 0.32 | Fair | |
| DH | 2016 | FH | <IV | <IV | IV | I | II | II | I | II | I | I | I | 0.30 | Very Poor |
| | | SH | <IV | <IV | <IV | I | I | I | I | II | I | I | I | 0.23 | Fair |
| | 2017 | FH | <IV | <IV | IV | II | II | II | I | II | I | II | II | 0.39 | Very Poor |
| | | SH | <IV | <IV | IV | I | II | II | II | II | I | I | II | 0.42 | Very Poor |
| | 2018 | FH | <IV | <IV | IV | II | II | II | II | II | I | I | II | 0.46 | Very Poor |
| | | SH | <IV | <IV | <IV | I | II | II | II | II | I | I | II | 0.37 | Poor |
| Mean | | <IV | <IV | IV | I | II | II | II | II | I | I | II | 0.36 | Very Poor | |
| OD | 2016 | FH | <IV | <IV | IV | I | I | II | I | I | I | I | I | 0.16 | Very Poor |
| | | SH | <IV | <IV | IV | I | I | I | I | I | I | I | II | 0.18 | Very Poor |
| | 2017 | FH | <IV | <IV | IV | I | I | I | I | I | I | II | II | 0.25 | Very Poor |
| | | SH | <IV | <IV | IV | I | I | I | I | I | I | I | II | 0.21 | Very Poor |
| | 2018 | FH | <IV | <IV | IV | I | I | I | I | I | I | I | II | 0.20 | Very Poor |
| | | SH | <IV | <IV | IV | I | I | I | I | I | I | I | II | 0.15 | Very Poor |
| Mean | | <IV | <IV | IV | I | I | I | I | I | I | I | II | 0.19 | Very Poor | |
| Mean | | <IV | <IV | IV | I | I | I | I | II | I | II | II | 0.29 | Very Poor | |

FH: First half-year, SH: Second half-year.

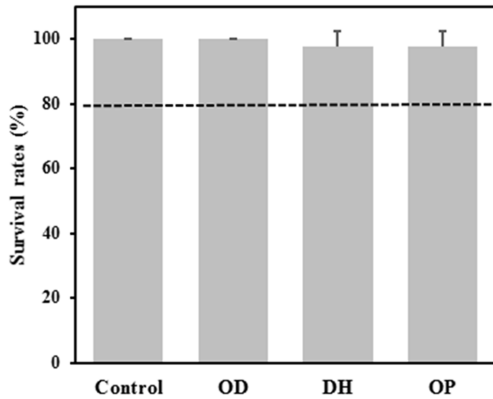


Fig. 2. Results of ecotoxicity assessment in the surface sediments of Jeju Island using the benthic amphipod (*H. azteca*). Black dotted lines indicate the ecotoxicity test criteria ($p < 0.05$, survival rates $< 80\%$).

외도천 지점에서 Ni 함량이 II 등급으로 평가되었다. 전 지점의 평균 함량으로부터 평가된 오염도는 TP 함량이 IV 등급, 금속류 중 Hg, Cr 및 Ni 함량이 II 등급으로 평가되었다. 이러한 결과는 동홍천 지점의 Hg 함량을 제외하면 제주도 지역의 특이한 토양 특성에서 기인한 TP, Cr 및 Ni 함량과 직접적인 관련이 있는 것으로 판단된다. 지점별 오염도는 동홍천과 외도천 지점에서 IV 등급의 TP 함량 때문에 매우 나쁨 상태, 옹포천 지점에서는 II 등급의 Cr과 Ni 함량의 영향으로 약간 나쁨 상태로 나타났다. 전지점에 대한 오염도는 IV 등급을 받은 TP 함량 때문에 하나 이상의 항목에서 IV 등급이 확인되어 매우 나쁨 상태로 평가되었다.

한편, 환경부 국립환경과학원에서는 지점별 오염 평가 결과에 따라 약간 나쁨 이상의 조사지점들에 대해 저서생물을 이용한 독성 시험을 통해 악영향을 확인하도록 되어있다. 따라서, 약간 나쁨 이상으로 평가된 제주도 3개 하천 퇴적물들은 저서생물인 *H. azteca*를 이용하여 생태독성 유무를 확인하였다(Fig. 2). *H. azteca* 생존율은 97.5-100% 범위로 나타났고, 생태독성 유무는 무독성으로 판정되었다. 독성 시험 판정기준은 대조구와 비교하여 통계적으로 유의한 차이($p < 0.05$)를 보이고, 생존율이 80% 이하인 경우 독성이 있는 것으로 판단한다.

3.3. 화산재 기원 TP, Cr 및 Ni

본 연구로부터 얻어진 제주도 하천 퇴적물 중 유기물, 영양염류 및 금속류의 함량을 선행 연구들에 의해 토양과 퇴적물로부터 보고된 결과들과 비교하여 Table 5

에 나타내었다. 국내 연구들은 제주도 지역의 자연 토양과 퇴적물을 대상으로 조사된 결과들이며, 국외 연구들은 제주도 지역과 유사한 화산재 기원의 토양 특성을 갖는 자연 토양과 퇴적물로부터 얻어진 결과들을 나타내었다.

본 연구에 의한 하천 퇴적물 중 TP 함량은 제주도 지역에서 조사된 자연 토양 중 결과와 비슷하거나 낮은 수준이었^{17,18}), 또한 화산재 기원의 토양 특성을 갖는 일본과 칠레의 자연 토양 중 결과와도 비슷한 함량으로 나타났다.^{9,19} 금속류의 경우도 전처리 방법에 따라 일부 차이가 나타날 수 있으나 대부분 국내의 결과와 비슷하였^{6,9,20-22}), 특히 Doelsch 등(2006), Ahn 등(2010) 및 Kelepertsis 등(2001)의 연구에 의하면 자연 토양 중 Cr 평균 함량은 각각 301, 662 및 920 mg/kg 그리고 Ni 평균 함량은 각각 206, 170, 및 994 mg/kg 으로 본 연구 결과보다 매우 높았다.^{11,18,23} 제주도 및 하와이의 퇴적물 결과와 비교해 보면, TP 함량은 Lee 등(2017)의 제주도 퇴적물 결과와 비슷하였²⁴), 금속류 함량의 경우도 위에서 설명된 자연 토양 결과들과 마찬가지로 제주도 및 하와이의 퇴적물을 대상으로 조사된 Lee 등(2017) 및 Sutherland(2000)의 결과와도 유사하였다.^{24,25} 하지만, 하와이 퇴적물의 경우는 Cu 및 Ni 함량이 본 연구 결과보다 상대적으로 높게 나타났다.²⁵

이상의 결과, 제주도 하천 퇴적물 중 높은 TP, Cr 및 Ni 함량은 국내의 보고된 화산재 기원의 토양과 퇴적물에서 조사된 결과들과 비슷함으로써 전형적인 화산재 토양 특성이 잘 반영되어 나타났다. 이러한 제주도 토양의 특이한 지질학적 영향을 받은 하천 퇴적물은 비록 TP, Cr 및 Ni 함량이 높을지라도 생태독성 평가에 의해 독성은 발현되지 않았다. 특히, TP, Cr 및 Ni 함량이 높은 제주도 하천 퇴적물을 퇴적물 오염 평가 기준에 적용할 경우 약간 나쁨 이상의 단계로 평가될 수밖에 없는 문제점이 있다. 따라서, 제주도 하천 퇴적물은 특이한 제주 지역 토양의 지질학적 특성이 반영된 오염 평가가 이루어져야 퇴적물의 오염도가 제대로 확인할 수 있을 것이다.

결론적으로, 제주도 하천 퇴적물은 특이한 제주 지역 토양의 지질학적 특성을 반영한 오염 평가가 필요하며, 향후에는 제주 지역뿐만 아니라 지질학적 특성이 뚜렷한 다른 지역도 퇴적물 오염 평가 방법에 대해 검토할 필요가 있다.

Table 5. Comparison of organic matter, nutrients, and heavy metals contents in soils and surface sediments from other previous studies

| Sample | Organic matter & nutrients | | | Heavy metals (mg/kg) | | | | | | | | Reference |
|---------------|----------------------------|-----------------------|---------------------------------------|--|-------------------------|-------------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| | IL (%) | TN (mg/kg) | TP (mg/kg) | Pb | Zn | Cu | Cd | Hg | As | Cr | Ni | |
| Soil | - ¹⁾ | - | - | 14.4±4.3 ²⁾ (6.9-38.6) ³⁾ | 33.3±27.1 (26.6-162) | 20.1±12.4 (3.7-65.8) | 0.24±0.08 (0.12-0.45) | 0.146±0.077 (0.010-0.374) | 6.1±5.8 (0.44-29.9) | 73.4±30.9 (17.3-181) | 52.3±32.1 (8.8-167) | Kim et al. (2015), Jeju Island |
| | - | - | - | 19.4 (10.4-28.5) | 52.2 (12.7-107) | 29.1 (13.0-54.8) | 0.51 (0.21-0.81) | - | - | 95.1 (19.4-188) | 46.1 (18.4-89.6) | Hyun et al. (2017), Jeju Island |
| | - | - | - | - | 108 | 40.0 | - | - | - | - | 79.2 | Lim et al. (2008), Jeju Island |
| | - | - | 4000 ⁴⁾ (2000-6000) | 44 (38-52) | 125 (98-192) | 49 (28-74) | 0.4 (0.2-0.7) | - | - | 662 (434-1164) | 170 (56-414) | Ahn & Chon (2010), Jeju Island |
| | - | - | (1600-8300) | - | - | - | - | - | - | - | - | Kim (1974), Jeju Island |
| | - | - | - | - | 162 (57.5-398) | 58.2 (6.5-164) | 0.19 (0.02-0.76) | 0.19 (0.03-0.81) | - | 301 (35-1110) | 206 (15.1-1040) | Doelsch et al. (2006), France |
| | - | - | - | 33 (5-256) | 95 (20-604) | 23 (11-63) | - | - | 22 (5-104) | 920 (163-2346) | 994 (183-2665) | Kelepertsis et al. (2001), Greece |
| | - | - | - | 55.6 (<5-1000) | 160 (22.9-1150) | 31.7 (4.76-437) | 0.41 (0.06-3.10) | 0.13 (<0.010-2.30) | 5.48 (<3-69.6) | 32.5 (2.85-224) | 28.4 (2.23-232) | Tijhuis et al. (2002), Norway |
| | - | - | 1500±1300 ⁴⁾ (87-11000) | 24±50 (1.0-1100) | 89±42 (2.5-330) | 48±48 (0.88-230) | 0.33±0.28 (0.021-3.4) | - | - | 58±38 (1.4-230) | 26±21 (0.20-110) | Takeda et al. (2004), Japan |
| | - | - | (1029-3000) | - | - | - | - | - | - | - | - | Borie & Rubio (2003), Chile |
| Sedi- ment | - | - | - | 13±7 (5-28) | 202±29 (162-268) | 174±17 (150-212) | 0.40±0.17 (0.28-0.52) | 0.051±0.032 (0.028-0.073) | - | - | 341±24 (302-379) | Sutherland (2000), Hawaii |
| | 2.10±1.78 (0.50-7.10) | 587±516 (130-1883) | 1357±229 (930-1862) | 13.4±9.1 (0.4-36.5) | 130±56 (42.5-287) | 27.3±16.9 (1.7-65.8) | 0.66±0.39 (0.22-1.26) | 0.050±0.092 (0.02-0.374) | 9.0±7.2 (0.3-24.0) | 89.7±39.7 (36.2-145) | 67.0±24.4 (31.3-120) | Lee et al. (2017), Jeju Island |
| | 1.67±0.85 (0.600-3.66) | 403±310 (101-1206) | 1684±296 (1207-2126) | 23.6±20.4 (1.90-62.0) | 248±160 (99.3-597) | 55.4±29.2 (24.6-120) | 0.309±0.157 (0.110-0.640) | 0.116±0.135 (0.0110-0.490) | 7.03±1.76 (3.20-10.8) | 122±61 (49.6-243) | 60.0±26.1 (21.5-134) | This study |

¹⁾No data, ²⁾Mean±SD or Mean, ³⁾Range (Min–Max), ⁴⁾presented as P₂O₅.

4. 결 론

본 연구는 제주도 하천의 퇴적물 중 유기물(IL), 영양염류(TN, TP) 및 금속류(8종 중금속) 항목들을 분석한 후 항목별 및 지점별로 오염도를 평가하여 인위적 또는 자연적 영향 여부를 파악하였다. 전지점의 IL, TN 및 TP 평균 함량은 각각 $1.67 \pm 0.85\%$, 403 ± 310 mg/kg 및 1684 ± 296 mg/kg, 금속류 8종들은 각각 23.6 ± 20.4 (Pb), 248 ± 160 (Zn), 55.4 ± 29.2 (Cu), 0.309 ± 0.157 (Cd), 0.116 ± 0.135 (Hg), 7.03 ± 1.76 (As), 122 ± 61 (Cr) 및 60.0 ± 26.1 mg/kg (Ni)였다. 항목별 오염도는 TP 항목이 IV등급, 금속류 중 Hg, Cr 및 Ni 항목이 II 등급으로 평가되었다. 지점별 오염도의 경우, 동홍천과 외도천 지점은 TP 항목이 IV 등급을 받아 매우 나쁨, 웅포천 지점은 Cr 과 Ni 항목이 II 등급 때문에 약간 나쁨 상태로 나타났다. 전지점에 대한 오염도는 하나 이상의 IV 등급 (TP 항목)이 확인되어 매우 나쁨 상태로 평가되었다. 또한, 제주도 하천 퇴적물 중 TP, Cr 및 Ni 함량을 국내의 선행 연구들과 비교한 경우, 이들 농도는 화산재 기원 토양의 연구 결과와 비슷하였다. 이러한 결과는 전형적인 화산재 토양 특성이 잘 반영되어 평가되었음을 확인할 수 있었다. 특히, TP, Cr 및 Ni 함량이 높은 제주도 하천 퇴적물을 퇴적물 오염 평가 기준에 적용할 경우 약간 나쁨 이상의 단계로 평가 받을 수밖에 없는 문제점을 확인하였다. 따라서, 제주도 하천 퇴적물은 특이한 제주 토양의 지질학적 특성을 반영한 오염 평가가 필요하며, 향후에는 제주 지역뿐만 아니라 지질학적 특성이 뚜렷한 다른 지역도 검토할 필요가 있다.

감사의 글

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2018-03-03-002).

참고문헌

1. B. J. Alloway, I. Thornton, G. A. Smart, J. C. Sherlock, and M. J. Quinn, "Metal availability", *Science of Total Environment*, **1988**, 75, 41-69.
2. V. M. Dekov, Z. Komy, F. Araújo, A. Van Put, and R. Van Grieken, "Chemical composition of sediments, suspended matter, river water and ground water of the Nile (Aswan-Sohag traverse)", *Science of Total Environment*, **1997**, 201, 195-210.

3. J. Y. Kim, G. Y. N. Eun, Y. K. Koh, S. T. Youn, K. H. Oh, and D. J. Kim, "Sedimentary environments and geochemical characters of the core sediments near Naju-Yeongam area in the lower part of the Yeongsan River, Cheonnam, Korea", *Journal of Korean Earth Science Society*, **2001**, 22(4), 301-316.
4. H. S. Oh, I. A. Huh, and J. H. Choi, "Laboratory Study of Phosphorus Fractionation in the Sediments of Yeongsan River", *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, **2017**, 39(9), 519-526.
5. 환경부, "물환경측정망 운영계획-퇴적물측정망(환경부고시 제2016-58호)", **2016**.
6. S. R. Kim, S. S. Hyun, S. T. Song, M. G. Lee, and S.-K. Kam, "Concentration of heavy metals in natural soils of Jeju island, Korea", *Journal of Environmental Science International*, **2015**, 24(2), 175-188.
7. Ministry of Environment, "Soil measuring network and results of research on the actual condition in 2005", **2006a**.
8. Ministry of Environment, "Results of detailed research for the areas exceeding Soil Contamination Warning Standards in 2005", **2006b**.
9. A. Takeda, K. Kimura, and S. Yamasaki, "Analysis of 57 elements in Japanese soils, with special reference to soil group and agricultural use", *Geoderma*, **2004**, 119, 291-307.
10. R. Burt, M. A. Wilson, M. D. Mays, and C. W. Lee, "Major and trace elements of selected pedons in the USA", *Journal of Environmental Quality*, **2003**, 32, 2109-2121.
11. E. Doelsch, V. Van de Kerchove, and H. Saint Macary, "Heavy metal content in soils of Reunion (Indian Ocean)", *Geoderma*, **2006**, 134, 119-134.
12. 환경부, "수질오염공정시험기준-퇴적물(환경부고시 제2012-99호)", **2015**.
13. 국립환경과학원, "하천·호소 퇴적물 오염평가 기준(국립환경과학원 예규 제 2015. 687)", **2015**.
14. ASTM (American Society of Testing Materials), "Standard test method for measuring the toxicity of sediment-associated contaminants with freshwater invertebrates", **2010**, E1705-05, Philadelphia.
15. U. Förstner and G. T. W. Wittmann, "Metal pollution in the aquatic environment", **1983**, 2nd Edition, Springer, New York.
16. H. J. Yang, T. W. Kang, K. M. Bong, H. J. Jeong, W. J. Yang, J. H. Han, H. J. S. H. Hwang, and K. Kim, "Assessment of heavy metal pollution in surface sediments of the Yeongsan river", *Journal of the Korean Society for Environmental Analysis*, **2018**, 24(4), 292-303.
17. 김형욱, "제주도 화산회토의 인산형태에 관한 연구", *한국농화학회지*, **1974**, 17(3), 219-232.
18. J. S. Ahn and C.H. Chon, "Geochemical distributions of Heavy metals and Cr behavior in natural and cultivated

- soils of volcanic Jeju island, Korea”, *Geosystem Engineering*, **2010**, 13(1), 9-20.
19. F. Borie and R. Rubio, “Total and organic phosphorus in Chilean volcanic soils”, *Gayana Botánica*, **2003**, 60(1), 69-78.
 20. S. S. Hyun, S. R. Kim, M. G. Lee, and S. K. Kam, “Chemical speciation of heavy metals in soils of Jeju island, Korea”, *Journal of Environmental Science International*, **2017**, 26(7), 847-858.
 21. H. C. Lim, K.-H. Moon, S. J. Jeon, K. M. Chang, and H. N. Hyun, “Characteristics of natural pedo-geochemical background for Ni, Cu and Zn in volcanic soils of Jeju”, *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, **2008**, 41(3), 199-205.
 22. L. Tihjuis, B. Brattli, and O. M. Sæther, “A Geochemical survey of topsoil in the city of Oslo, Norway”, *Environmental Geochemistry and Health*, **2002**, 24, 67-94.
 23. A. Kelepertsis, D. Alexakis, and I. Kita, “Environmental geochemistry of soils and waters of Susaki area, Korinthos, Greece”, *Environmental Geochemistry and Health*, **2001**, 23, 117-135.
 24. J. Y. Lee, W. J. Yang, H. J. Jeong, D. J. Seo, and J. C. Lee, “Distribution and pollution assessment of river sediments flowing into the Jeju coast”, *Journal of the Korean Society of Urban Environment*, **2017**, 17(4), 409-417.
 25. R. A. Sutherland, “Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii”, *Environmental Geology*, **2000**, 39(6), 611-627.