

Research Article



CrossMark

Open Access

영산강수계 의료기원 방사성요오드(^{131}I) 핵종의 분포 및 거동평가

강태우^{1*}, 한영운¹, 박원표², 송광덕¹, 황순홍¹, 강태구³, 김경현¹

¹국립환경과학원 영산강물환경연구소, ²제주대학교 생물산업학부 식물자원환경전공, ³국립환경과학원 물환경평가연구과

The Distribution and Behavior of Medically-derived ^{131}I in the Yeongsan River Basin
Tae-Woo Kang^{1*}, Young-Un Han¹, Won-Pyo Park², Kwang-Duck Song¹, Soon-Hong Hwang¹, Tae Gu Kang³ and Kyung Hyun Kim¹(Yeongsan River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research, Gwangju 61011, Korea, ²Faculty of Bioscience and Industry, Jeju National University, Jeju 63243, Korea, ³Water Quality Assessment Research Division, National Institute of Environmental Research, Incheon 22689, Korea)

Received: 23 August 2018/ Revised: 13 September 2018/ Accepted: 17 October 2018

Copyright © 2018 The Korean Society of Environmental Agriculture

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

ORCID

Tae-Woo Kang

<http://orcid.org/0000-0002-5021-2330>

Won-Pyo Park

<http://orcid.org/0000-0002-6547-6240>

Abstract

BACKGROUND: Recently, the use of ^{131}I for diagnosis and treatment of thyroid cancer has been increasing, and the radionuclide is continuously released into aquatic ecosystem. This study was carried out to investigate the ^{131}I concentrations in mainstreams, tributaries, and sewage wastewater treatment plants (SWTPs) of the Yeongsan River Basin and to identify their origins from the assessment of behaviors in the rivers.

METHODS AND RESULTS: The water samples were collected from 19 sites including mainstreams (13), tributaries (4) and SWTPs (2). The ^{131}I concentration was measured using a gamma-ray spectrometry with a HPGe detector. The ^{131}I in SWTPs was detected mostly in the discharged effluent at the sampling sites. However, from the surface water of the rivers, ^{131}I was found only at two sites from each sampling period of the first (MS4 and MS10) and the second half (MS4 and MS7) of the year 2017. The concentrations of ^{131}I in the effluent discharged from SWTPs were in the range of 0.0870 to 3.87 Bq/L for SWTP1, and <MDC to 0.534 Bq/L for SWTP2. The concentrations of the isotope detected in surface water of

the rivers were between 0.0908 to 0.174 Bq/L. The behavior assessment of ^{131}I in the river revealed that it was not detected in the upper streams of the mainstreams and tributaries, while continuous detection was found in the SWTPs and downstream sites affected by the effluent. However, the concentration of ^{131}I decreased downstream, eventually becoming undetectable. Such behavior was closely related to the behavior found in the SWTPs.

CONCLUSION: These results indicated that medically-derived ^{131}I was discharged to the river via sewage effluent at the SWTPs. It is necessary to evaluate the influence of aquatic ecosystems through continuous monitoring in the future.

Key words: ^{131}I , Medically-derived, Radionuclides, SWTPs, Yeongsan River

서 론

방사성 요오드(^{131}I)는 비교적 반감기(약 8.04 일)가 짧고 강한 감마선(364.5 keV, 81.2%)을 방출하는 핵분열 생성물이다. 환경 중에 존재하는 ^{131}I 는 핵실험 및 원자력 발전소 사고 등으로 방출되나, 대부분은 의학적 목적으로 생산되어 병원에서 사용된 후 배출된다. ^{131}I 는 병원에서 주로 갑상선 질환의 환자들에게 치료와 진단을 위해 의학적으로 사용되며(ICRP, 2004), 최근 국내에서도 갑상선암 환자의 발생 빈도가 증가함에 따라 ^{131}I 핵종의 사용량이 증가하고 있다

*Corresponding author: Tae-Woo Kang
Phone: +82-62-970-3990; Fax: +82-62-970-3990;
E-mail: kangtw@korea.kr

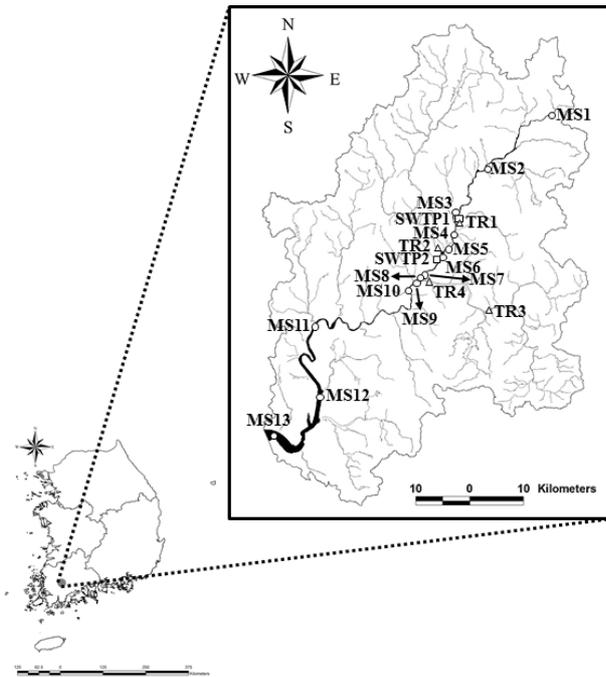


Fig. 1. Map showing sampling sites for radioiodine (¹³¹I) measurement in the mainstreams (○), tributaries (△) and SWTPs (□) of the Yeongsan River Basin. The dark and light lines represents the mainstreams (MS) and tributaries (TR), respectively.

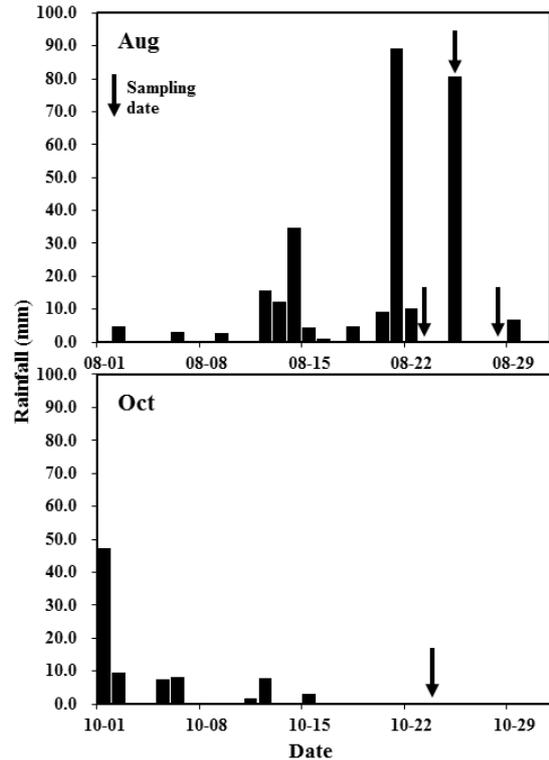


Fig. 2. Daily variations of rainfall in August and October 2017 at the Gwangju metropolitan city.

(KARA, 2017).

환자에게 투여된 ¹³¹I 핵종은 병원과 가정에서 하수를 통해 배설물로 배출되어 하수처리장으로 유입되고, 하수처리장에서 하수과정을 거쳐 하천과 호소 및 해양 등 다양한 수생태계 환경으로 방류되고 있는 것으로 많은 연구자들에 의해 보고되었다(Martin and Fenner, 1977; Moran et al., 2002; ICRP, 2004). 영국 환경청(Punt et al., 2007)과 국제방사선 방호위원회(ICRP, 1997)에 의하면, 병원에서 사용된 ¹³¹I 핵종은 환자에게 투여된 후 약 65% 정도 분뇨로 배출되어 하수처리장으로 유입된 후 하수처리 과정을 거쳐 방류수를 통해 최종적으로 약 30%가 환경으로 방출된다고 하였다.

외국의 경우, 수생태계 환경 중 ¹³¹I 핵종은 하수처리장으로부터 유래되어 존재하며, 그리고 지표수, 퇴적물, 조류, 어패류 및 하수슬러지 등 다양한 환경 시료들에서 검출되었다고 오래전부터 많은 연구들에 의해 보고되었으나(Moss, 1973; Sodd et al., 1975; Howe and Hunt, 1984; Howe and Lloyd, 1986; Warsh et al., 1988; Erlandsson et al., 1989; Puhakainen, 1998; Waller and Cole, 1999; Punt et al., 2007; Kleinschmidt, 2009; Carolan et al., 2011), 우리나라의 경우는 일부 연구가 수행되고 있을 뿐 아직까지도 미흡한 상태이다(Chang et al., 2011; Kim et al., 2015; Cho et al., 2016).

그러므로 본 연구는 영산강 수계에 위치한 하수처리장 및 하천 중에서 인공방사성핵종 ¹³¹I의 농도 분포와 거동 평가를 통해 기원을 확인하고자 수행하였다.

재료 및 방법

조사지점

본 연구의 대상유역인 영산강은 유역면적이 3,371 km²이고, 본류의 유로연장이 136 km로 광주천, 황룡강, 지석천, 고막원천 및 함평천 등의 지류가 합류하여 흐른다. 영산강 수계 중류에는 광주광역시 대부분의 생활하수와 산업공단의 공업용수를 복합적으로 처리하는 2개의 하수처리장이 있다. 이들의 처리용량은 각각 60×10⁴ m³/day 및 12×10⁴ m³/day이며, 처리된 하수는 영산강 본류로 직접 방류된다.

조사지점은 영산강 수계에 위치한 하천 중 본류 13개 및 지류 4개 지점과 하수처리장 2개 지점을 포함하여 총 19개 지점을 선정하였다(Fig. 1). 하천 표층수 중 ¹³¹I의 농도는 2015년부터 2017년까지 상·하반기로 구분하여 년 2회, 하수처리장 방류수는 2016년 9월부터 2017년 8월까지 월 1회 조사하였다. 그리고 ¹³¹I의 거동 평가는 영산강 수계 중류에 위치한 하수처리장 및 주변 하천을 대상으로 2017년 8월(강우)과 10월(비강우)에 조사하였다.

강수량은 광주기상청(www.kma.go.kr), 유량 변화는 영산강홍수통제소(www.yeongsanriver.go.kr)에서 관측된 자료들을 활용하였다. 강우시 및 비강우시 월 강수량은 각각 280.4 mm 및 85.4 mm이었고, 8월 25일에는 80.7 mm이었다(Fig. 2). 유량은 8월 23일부터 8월 28일까지 5일간 영산강 본류 MS3, MS4 및 MS7 지점의 하류와 지류 TR1 및 TR2 지점의 상류에 설치된 5개 관측소로부터 얻어진 자료들을 이

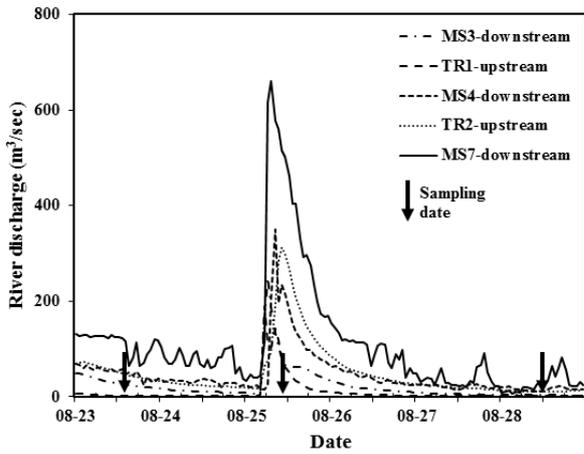


Fig. 3. The variation of river discharge rates in upstream and downstream between MS3 and MS7 sites during rainy period in 2017.

용하였고, 강우가 발생한 시기에 유량이 급증하는 특성들을 보였다(Fig. 3).

시료채취 및 전처리

하천 표층수와 하수처리장 방류수 시료는 반돈 채수기 및 비이커로 채취하였다. ¹³¹I 핵종의 농도 분포 조사를 위한 시료는 전처리 과정 없이 채취한 시료 1 L을 정량하여 직접 분석에 사용하였고, ¹³¹I 핵종의 거동 평가를 위한 시료는 전처리용 유리 비이커에 채취한 시료 10 L을 넣고 증발 및 농축 과정을 거쳐 분석에 사용하였다. 분석용 시료들은 마리넬리 용기(Marinelli, 1 L)에 옮겨 측정하였다.

방사성요오드(¹³¹I) 분석

하천 표층수와 하수처리장 방류수 시료 중 ¹³¹I 분석은 고순도 게르마늄 검출기(GEM-MX7080P4-RB-SMP-S, Ortec, USA; GCDX-40180, BSI, Latvia)와 다중과고분석기(DSPEC-50, Ortec, USA; BOSON, BSI, Latvia)로 구성된 감마분광계를 이용하여 80,000초 동안 측정하였다. 측정된 스펙트럼은

Table 1. The concentration of ¹³¹I in sewage effluent samples collected from the SWTPs of the Yeongsan River Basin from 2016 to 2017

Sampling date	¹³¹ I (Bq/L)	
	SWTP1	SWTP2
2016.09	1.06±0.04	0.354±0.024
2016.10	0.0870±0.0161	<0.0255 ^{a)}
2016.11	3.87±0.10	0.534±0.031
2016.12	0.521±0.024	0.498±0.024
2017.01	0.229±0.018	0.464±0.023
2017.02	0.192±0.018	0.142±0.017
2017.03	0.492±0.024	0.247±0.021
2017.04	0.352±0.020	0.129±0.016
2017.05	0.199±0.037	0.460±0.031
2017.06	0.491±0.024	0.261±0.022
2017.07	0.276±0.018	0.448±0.013
2017.08	0.421±0.021	0.491±0.025
Range	0.0870 ~ 3.87	<0.0255 ~ 0.534

^{a)}less than minimum detectable concentration (<MDC)

Aptec software (Aptec Co.)를 이용하여 ¹³¹I의 감마선 에너지 364.5 keV (감마 방출율 81.2%, 반감기 약 8.04일)으로 분석하였고, 모든 시료에 대한 방사능 농도는 시료의 채취일 시와 계측시간에 따른 ¹³¹I의 방사능 붕괴를 고려하여 보정한 후 계산하였다. 측정에 사용된 검출기들의 상대효율, 에너지 분해능(⁶⁰Co, 1332 keV) 및 peak/compton 비는 각각 66%와 40%, 1.9 keV와 1.8 keV 및 75:1과 62:1이었다. 하천 표층수와 하수처리장 방류수의 최소 검출 가능농도(Minimum Detectable Concentration, MDC)는 각각 0.0095~0.1195 Bq/L 및 0.0191~0.0693 Bq/L 범위였다. MDC 값은 상대효율이 다른 감마분광계 사용과 검출기로부터 시료 사이의 간격을 달리하여 측정된 조건 때문에 Fig. 4와 같이 다르게 나타났다.

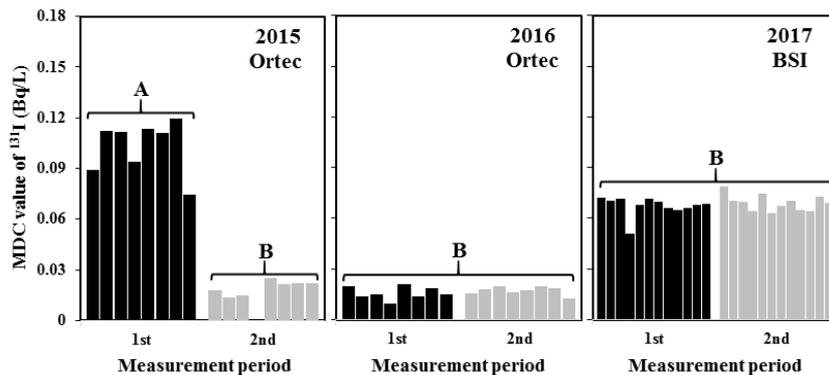


Fig. 4. The variation of MDC value of ¹³¹I in water samples collected from the mainstreams and tributaries of the Yeongsan River Basin from 2015 to 2017 (Distance from the detector; A: 2 cm, B: 0 cm).

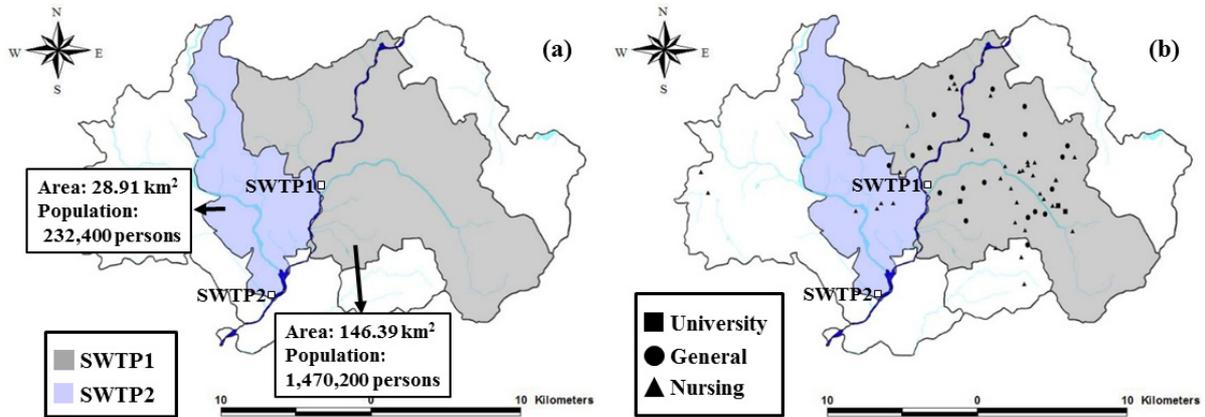


Fig. 5. Location map of SWTPs treatment areas (a) and hospitals (b) located in these areas at the Gwangju metropolitan city.

감마분광계의 에너지 및 효율 교정에 사용된 표준시료는 감마선 에너지가 50 keV에서 2 MeV 사이의 감마선을 방출하는 ^{241}Am , ^{109}Cd , ^{57}Co , ^{139}Ce , ^{203}Hg , ^{113}Sn , ^{85}Sr , ^{137}Cs , ^{88}Y 및 ^{60}Co 의 감마 핵종이 혼합되어 있는 감마 교정용 표준 용적선원(SRS 108209, EZA Co.)을 사용하였다. 표준시료는 표준 용적선원을 1 M HCl 용액으로 적당히 희석하여 조제한 다음 감마분광계로 30,000초 동안 측정하여 분석용 Aptec software로 에너지 교정 및 측정 효율을 계산하였다.

결과 및 고찰

하수처리장 방류수 중 방사성요오드(^{131}I) 농도

영산강 수계에 위치한 하수처리장 방류수 중 ^{131}I 농도는 2016년 9월부터 2017년 8월까지 월 1회 조사하여 Table 1에 나타내었다. 하수처리장 SWTP1과 SWTP2 지점은 각각 0.0870~3.87 Bq/L 및 MDC이하~0.534 Bq/L 범위로 대부분 검출되었고, 두 지점 모두 2016년 10월에 가장 낮은 반면 2016년 11월에 가장 높았으나 조사 시기에 따라 다양한 분포 특성을 보였다. 하수처리장간 ^{131}I 농도를 비교한 결과, SWTP1 지점은 SWTP2 지점보다 대부분 높게 검출되었다. 이는 Fig. 5에서 보는 것처럼 SWTP1 지점의 하수처리장은 주변에 거주 인구가 병원들이 밀집해 있어 가정과 병원으로부터 유입된 많은 하수의 영향으로 하수처리 용량($60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{day}$)이 SWTP2 지점($12 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{day}$)보다 약 5배 정도 많았기 때문이라 생각된다. Fig. 5는 두 지점의 하수처리장에 대한 처리구역과 면적 그리고 처리 구역 내의 거주 인구를 나타내었고(광주광역시, 2017), 또한 처리구역 내에 위치한 갑상선 진단과 치료 및 요양을 위한 주요 병원들의 지리적 위치를 표시하였다.

이러한 결과는 Rose 등(2013)과 Montenero 등(2017)에 의해 각각 MDC이하~8.1, MDC이하~2.7, MDC이하~0.61 Bq/L 및 MDC이하~0.95, 0.03~4.52 Bq/L 범위로 하수처리장 방류수에서 검출된 결과들과 비슷하였고, 이들 농도들은 인구밀도와 하수처리 시설의 크기 그리고 주변 병원들의 영향을 받아 다르게 나타났다고 보고하였다. 하지만,

Rose 등(2012)은 갑상선 암 진단 치료시설의 소규모 하수처리장을 대상으로 조사한 결과 1.8~227 Bq/L 범위로 본 연구 결과보다 높게 검출되었다. 이는 환자들에게 투여된 ^{131}I 핵종이 체내에서 대사 및 배출 과정을 거쳐 하수처리장으로 직접 유입되었기 때문이라 평가하였다.

하천 중 방사성요오드(^{131}I) 농도

영산강 수계에 위치한 하천의 표층수 중 ^{131}I 농도는 2015년부터 2017년까지 상·하반기에 년 2회 조사하여 Table 2에 나타내었다. 하천 지점들은 2015년과 2016년에 모두 불검출되었고, 2017년에는 상반기(MS4, MS10)와 하반기(MS4, MS7)에 각각 두 지점에서만 검출되었다. 상반기에 검출된 농도는 각각 $0.119 \pm 0.017 \text{ Bq/L}$ 및 $0.0908 \pm 0.0206 \text{ Bq/L}$, 하반기에는 각각 $0.170 \pm 0.022 \text{ Bq/L}$ 및 $0.174 \pm 0.021 \text{ Bq/L}$ 이었다. 표층수 중 ^{131}I 농도는 Table 1에서 보는 것처럼 ^{131}I 핵종이 검출된 두 개의 하수처리장 하류에 위치한 MS4, MS7 및 MS10 지점의 하천들에서만 방류수의 영향으로 검출되었다. 반면, 방류수의 영향이 없거나 적은 상·하류 및 유입지점의 하천들에서는 불검출 되었다. 검출된 하천들 중 MS4 지점의 경우, 2017년 상·하반기에 지속적으로 검출된 것은 하수처리 용량이 가장 많은 SWTP1 지점의 하수처리장과 가장 인접해 있어서 방류수로부터 직접 영향을 받았기 때문이라 생각되며, 2015년부터 2016년까지는 조사를 수행하지 않아 확인할 수 없었다. 그리고 MS7과 MS10 지점은 SWTP2 지점의 하수처리장 방류수로부터 직접 영향을 받지만 하수처리 용량이 적고 상류에 유입지점들에 의한 희석효과 때문에 검출되는 빈도가 조사 시기에 따라 다르게 나타난 것으로 생각된다.

본 연구 대상구역의 하천 중 ^{131}I 농도는 포르투갈의 Tejo 강과 미국의 Potomac 강에서 각각 MDC이하~0.56 Bq/L와 MDC이하~6.07 Bq/L 범위로 검출되었다는 보고와 비슷하였다(Malta et al., 2013; Rose et al., 2013).

최근 국내 조사에 의하면, Kim 등(2015)과 Cho 등(2016)은 하천과 하수처리장 방류수에서 각각 MDC이하~0.799 Bq/L와 0.03~1.8 Bq/L 범위로 검출되었고, Chang 등

Table 2. The concentration of ¹³¹I in water samples collected from the mainstreams and tributaries of the Yeongsan River Basin from 2015 to 2017

Site	Sampling date	¹³¹ I (Bq/L)	Sampling date	¹³¹ I (Bq/L)
MS1	2015.05.19	<0.0892 ^{a)}	2015.10.05	<0.0178
MS2	2015.04.14	<0.112	2015.10.07	<0.0138
MS3	2015.04.16	<0.111	2015.10.12	<0.0147
TR2	2015.04.20	<0.0944	2015.10.14	NA ^{b)}
MS7	2015.05.28	<0.114	2015.10.20	<0.0250
TR4	2015.04.27	<0.111	2015.10.22	<0.0216
MS10	2015.04.29	<0.119	2015.10.26	<0.0222
MS13	2015.06.10	<0.0745	2015.10.28	<0.0220
MS1	2016.04.04	<0.0201	2016.09.22	<0.0157
MS2	2016.04.06	<0.0140	2016.09.20	<0.0180
MS3	2016.04.12	<0.0148	2016.09.29	<0.0196
TR2	2016.04.14	<0.00952	2016.09.26	<0.0160
MS7	2016.05.09	<0.0211	2016.10.04	<0.0171
TR4	2016.05.19	<0.0137	2016.10.06	<0.0195
MS10	2016.05.11	<0.0188	2016.10.10	<0.0184
MS13	2016.06.01	<0.0152	2016.10.25	<0.0125
MS1	2017.04.18	<0.0719	2017.09.18	<0.0786
MS2	2017.04.20	<0.0701	2017.09.19	<0.0701
MS3	2017.04.24	<0.0715	2017.09.21	<0.0696
MS4	2017.04.26	0.119±0.017	2017.09.25	0.170±0.022
TR2	2017.06.07	<0.0678	2017.10.18	<0.0745
MS7	2017.05.08	<0.0718	2017.09.26	0.174±0.021
TR3	2017.05.22	<0.0699	2017.10.23	<0.0676
TR4	2017.05.02	<0.0663	2017.10.25	<0.0702
MS10	2017.05.24	0.0908±0.0206	2017.10.10	<0.0647
MS11	2017.05.30	<0.0658	2017.10.11	<0.0643
MS12	2017.06.14	<0.0681	2017.10.27	<0.0728
MS13	2017.05.31	<0.0686	2017.10.16	<0.0691

^{a)}less than minimum detectable concentration (<MDC), ^{b)}Not analysed

(2011)은 하수처리장에 대한 ¹³¹I 핵종 기원 평가 연구에서 방류수 중에 0.332~3.50 Bq/L 수준으로 검출되었음을 보고하였다. 또한 한국원자력안전기술원에서(KINS)는 2006년부터 2011년까지 6년간 약 180개 전국 하천을 대상으로 조사하였는데, ¹³¹I 농도는 MDC 이하~5.62 Bq/L 범위로 본 연구 결과와 비슷하였고, 특히 본 연구 대상구역이 포함된 하천 지점들에서는 MDC 이하~0.886 Bq/L 범위로 보고하였다(KINS, 2006-2011).

하천에서 ¹³¹I 거동 평가

하수처리장과 하천에서 검출되는 ¹³¹I 핵종에 대한 거동 평가는 영산강 수계 중류에 위치한 하수처리장(STWP1, STWP2)과 이들로부터 상류 또는 하류에 인접해 있는 본류 7개(MS3~MS9) 및 지류 3개(TR1~TR2, TR4) 지점의 하천들을 대상으로 2017년 8월(강우)과 10월(비강우시)에 조사하였다.

Fig. 6은 강우시 하천 중 ¹³¹I 거동 평가를 강우 발생 전·중·후로 구분하여 분석한 결과를 나타내었다. 강우 발생 전(8월 23일)의 경우 ¹³¹I 핵종은 2개의 하수처리장 방류수에서 모두 검출되었고, 그리고 이들 하류에 위치한 본류 지점의 모든 하천(MS4, MS5, MS6, MS7)들에서도 검출되었다. 하지만 가장 상류에 위치한 본류 MS3 및 지류 TR1와 TR2 지점의 하천들에서는 모두 검출되지 않았다. 강우 발생 중(8월 25일, 80.7 mm)에는 하수처리장 방류수의 ¹³¹I 농도가 강우 발생 전 보다 약 5~8배 정도 높았으나, 하수처리장과 인접해 있는 MS4, MS5와 MS7 지점의 ¹³¹I 농도는 강우 발생 전과 비슷하였다. 이는 Fig. 3에서 보는 것처럼 강우의 영향으로 모든 하천 지점들의 유량이 증가됨으로써 ¹³¹I 농도가 희석된 것으로 생각된다. 반면에 본류 MS6 지점과 지류 TR1 지점의 하천들에서는 강우 발생 전과 반대 경향을 보였다. 이러한 원인은 상대적으로 많은 유량이 발생한 지류 TR2 지점이 본류

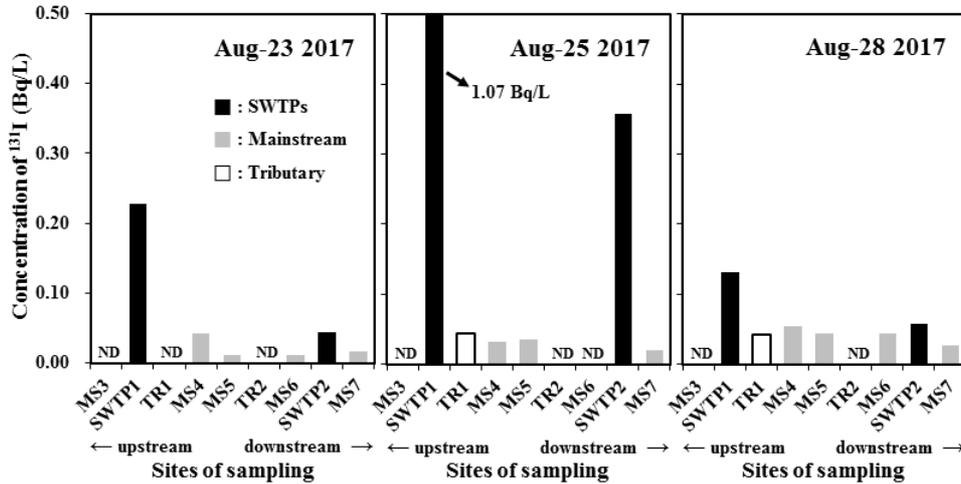


Fig. 6. The distribution of ¹³¹I concentration in water samples collected from the mainstreams, tributaries and SWTPs of the Yeongsan River Basin during rainy period (ND: less than minimum detectable concentration, <MDC).

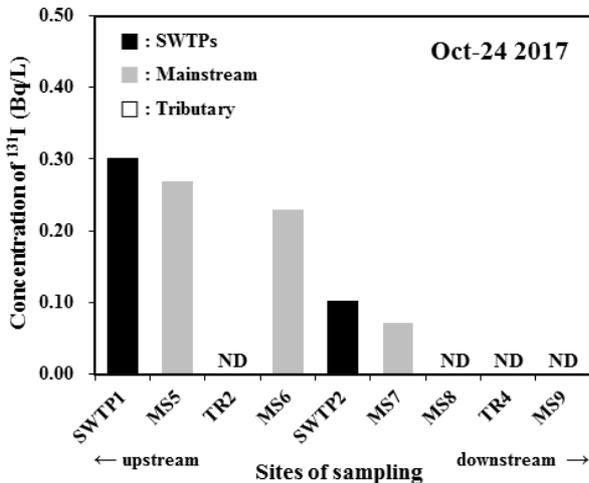


Fig. 7. The distribution of ¹³¹I concentration in water samples collected from the mainstreams, tributaries and SWTPs of the Yeongsan River Basin during dry period (ND: less than minimum detectable concentration, <MDC).

로 유입되어 하류에 위치한 MS6 지점에 영향을 주었기 때문에 불검출 된 것으로 판단된다. 그리고 TR1 지점의 경우는 SWTP1 하수처리장의 합류식 하수처리 특성으로 강우시 유입된 하수량이 너무 많아 미처리 하수가 하천으로 직접 방류되었기 때문에 검출된 것으로 생각된다. 강우 발생 후(8월 28일)에는 지류 TR1 지점을 제외하면 강우 발생 전과 비슷한 경향을 보였으나, 지류 TR1 지점의 경우는 강우 발생에 따른 결과와 마찬가지로 하천에서 지속적으로 검출되는 특성을 보였다.

비강우시(10월 24일)에 조사한 ¹³¹I 농도는 Fig. 7에서 보는 것처럼 강우 발생 전과 같은 경향을 보였고, 하수처리장 방류수와 본류 중 MS5, MS6 및 MS7 지점들에서만 검출되었으나 하류에 위치한 본류 MS8 및 MS9 지점과 지류 TR2 과 TR4 지점들에서는 검출되지 않았다.

이상의 결과로부터 ¹³¹I 핵종은 하수처리장의 영향을 받지 않는 가장 상류의 본류와 지류의 하천 지점들에서 검출되지 않는 반면 하수처리장과 이들 하류에 위치한 하천 지점들에서만 지속적으로 검출되었다. 또한 하류로 갈수록 농도가 감소하거나 불검출 되는 경향이 나타나 하천에서 검출되는 ¹³¹I 핵종은 상류에 위치한 하수처리장의 방류수로부터 영향을 받은 것으로 평가되었다. 따라서, Table 2와 같이 2017년에 ¹³¹I 핵종이 검출된 하천 지점들은 이러한 거동 평가로부터 충분히 설명되어 질 수 있었다.

방사성요오드 중 ¹³¹I 핵종은 핵실험 및 원자력 발전소 사고 등에 의해 환경 중에 존재하지만, 대부분은 병원에서 갑상선 질환의 치료와 진단용으로 환자에게 투여된 것이 배설물에 포함되어 가정과 의료 시설로부터 하수관을 통해 하수처리장으로 유입되는 것으로 많이 알려져 있다(Martin and Fenner, 1977; Moran *et al.*, 2002; ICRP, 2004). 그리고 하수처리장으로 유입된 ¹³¹I 핵종은 하수처리 과정을 거쳐 수 환경으로 방류된 후 지표수, 퇴적물, 조류, 어패류, 하수슬러지 등 다양한 환경 시료들에서 극미량 검출되었고, 이러한 것들은 많은 연구자들로부터 의료 기원으로 평가되었다(Ruchhott and Feitelberg, 1951; Pritchard and Gessel, 1981; Martin and Fenner, 1997; Smith *et al.*, 2008; Fischer *et al.*, 2009; Morita *et al.*, 2010; Jimenez *et al.*, 2011; Malta *et al.*, 2013; Rose *et al.*, 2013; Montenero *et al.*, 2017).

국내에서 Chang 등(2011)은 영국 환경청(Punt *et al.*, 2007)과 국제방사선방호위원회(ICRP, 1997)에서 제안된 간단한 수치모사 모델링으로부터 하수처리장에서 검출된 ¹³¹I 핵종을 의료 기원임을 보고하였고, 이들 농도는 병원에서 갑상선 암의 진단과 치료 목적으로 환자에게 사용된 투여량 및 하수처리장의 유입량 등과 밀접한 관계가 있다고 하였다.

종합적으로, 하천에서 검출되는 인공방사성물질 ¹³¹I 핵종은 하수처리장에서 유래된 것으로 의료 기원임을 확인할 수

있었고, 이들 농도는 WHO의 음용수 권고치인 10 Bq/L보다 극미량으로 무시할 수준이었으나 향후 지속적인 모니터링을 통해 수생태계 미치는 영향에 대해 평가할 필요가 있다고 판단된다. 또한 하수처리장 기원의 다양한 오염원들을 추적 평가하는데 유용하게 활용될 것이라 기대된다.

요 약

본 연구는 영산강 수계에 위치한 하수처리장 및 하천 중 인공방사성핵종 ¹³¹I의 농도 분포와 하천에서 거동 평가로부터 기원을 확인하고자 수행하였다. 조사지점은 하천 중 분류 13개 및 지류 4개 지점과 하수처리장 2개 지점을 포함하여 총 19개 지점을 선정하였다. ¹³¹I 방사능 분석은 고순도 게르마늄 검출기와 다중과고분석기로 구성된 감마분광계를 이용하여 계측하였다.

하수처리장 중 ¹³¹I 핵종은 두 지점의 방류수에서 대부분 검출되었으나, 하천의 표층수는 2017년 상반기(MS4, MS10) 및 하반기(MS4, MS7)에만 각각 두 지점에서 검출되었다. 하수처리장 방류수 중 ¹³¹I 농도는 각각 0.0870~3.87 Bq/L 및 MDC 이하~0.534 Bq/L, 검출된 하천 표층수는 0.0908~0.174 Bq/L 범위였다. 하천에서 ¹³¹I 거동 평가 결과, 분류 중에서 가장 상류와 지류의 하천 지점들에서는 검출되지 않았고, 반면 하수처리장과 이들의 영향을 받는 하류의 하천 지점들에서는 지속적으로 검출되었다. 하지만 하류 하천으로 갈수록 감소하다가 불검출 되어 하수처리장과 밀접한 관계가 있었다. 이상의 결과, 하천에서 검출되는 ¹³¹I 핵종은 하수처리장에서 유래된 것으로 의료 기원임을 확인할 수 있었다.

Note

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgement

This work was supported by a grant from the National Institute of Environment Research (NIER), funded by the Ministry of Environment (MOE) of the Republic of Korea (NIER-2018-03-03-002)

References

- Carolan, J. V., Hughes, C. E., & Hoffmann, E. L. (2011). Dose assessment for marine biota and humans from discharge of ¹³¹I to the marine environment and uptake by algae in Sydney, Australia. *Journal of Environmental Radioactivity*, 102(10), 953-963.
- Chang, B. U., Choi, S. W., Song, M. H., Lee, J. S., & Kim, Y. (2011). Medically used radionuclides (¹³¹I, ^{99m}Tc) in the urban sewage system: the case of the Daejeon metropolitan city, Korea. *Radiation Protection Dosimetry*, 146(1-3), 318-321.
- Cho, Y. H., Seol, B. N., Kim, W. S., Min, K. O., Lee, J. B., & Lee, S. H. (2016). A case study about counting uncertainty of radioactive iodine (¹³¹I) in public waters by using gamma spectrometry. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 38(1), 42-46.
- Erlandsson, B., Bjurman, B., & Mattsson, S. (1989). Calculation of radionuclide ground deposition by means of measurements on sewage sludge. *Water, Air, and Soil Pollution*, 45(3-4), 329-344.
- Fischer, H. W., Ulbrich, S., Pittauerova, D., & Hettwig, B. (2009). Medical radioisotopes in the environment—following the pathway from patient to river sediment. *Journal of Environmental Radioactivity*, 100(12), 1079-1085.
- Howe, J. R., & Hunt, A. E. (1984). Swan thyroid glands and river algae as indicators of iodine-125 and iodine-131 in the River Trent and its tributaries. *Science of the Total Environment*, 35(3), 387-401.
- Howe, J. R., & Lloyd, M. K. (1986). Radio-iodine in thyroid glands of swans, farm animals and humans, also in algae and river water from the Thames Valley, England. *Science of the Total Environment*, 48(1-2), 13-31.
- Jimenez, F., Deban, L., Pardo, R., Lopez, R., & Garcia-Talavera, M. (2011). Levels of ¹³¹I and six natural radionuclides in sludge from the sewage treatment plant of Valladolid, Spain. *Water, Air, and Soil Pollution*, 217(1-4), 515-521.
- Kim, J. Y., Jung, H. J., An, M. J., Hong, J. K., Kang, T. G., Kang, T. W., Cho, Y. H., Han, Y. U., Seol, B. N., Kim, W. S., & Kim, K. H. (2015). Status of national monitoring program for environmental radioactivity and investigation of artificial radionuclide concentrations (¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs and ¹³¹I) in rivers and lakes. *Analytical Science & Technology*, 28(6), 377-384.
- Kleinschmidt, R. (2009). Uptake and depuration of ¹³¹I by the macroalgae *Catenella nipae*—Potential use as an environmental monitor for radiopharmaceutical waste. *Marine Pollution Bulletin*, 58(10), 1539-1543.
- Malta, M., Oliverira, J. M., Silva L., & Carvalho, F. P. (2013). Radioactivity from Lisboa urban wastewater discharges in the Tejo River Estuary. *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 13(4), 399-408.
- Martin, J. E., & Fenner, F. D. (1997). Radioactivity in municipal sewage and sludge. *Public Health Reports*, 112(4), 308-318.
- Montenero, M. P., Dilbone, E. K., & Waples, J. T. (2017). Using medically-derived iodine-131 to track sewage

- effluent in the Laurentian Great Lakes. *Water Research*, 123, 773-782.
- Moran, J. E., Oktay, S. D., & Santschi, P. H. (2002). Sources of iodine and iodine 129 in rivers. *Water Resources Research*, 38(8), 1149-1158.
- Morita, T., Niwa, K., Fujimoto, K., Kasai, H., Yamada, H., Nishiutch, K., Sakamoto, T., Godo, W., Taino, S., Hayashi, Y., Takeno, K., Nishigaki, T., Fujiwara, K., Aratake, H., Kamonoshita, S., Hashimoto, H., Kobayashi, T., Otsuka, S., & Imanaka, T. (2010). Detection and activity of iodine-131 in brown algae collected in the Japanese coastal areas. *Science of the Total Environment*, 408(16), 3443-3447.
- Moss, C. E. (1973). Control of radioisotope releases to environment from diagnostic isotope procedures. *Health Physics*, 25, 197-198.
- Pritchard, H. M., Gessel, T. F., & David, E. (1981). Iodine-131 levels in sludge and treated municipal wastewaters near a large medical complex. *American Journal of Public Health*, 71(1), 47-52.
- Puhakainen, M. (1998). Detection of radionuclides in sewage water and sludge. *Radiochemistry*, 40(6), 529-533.
- Punt, A., Wood, M., & Rose, D. (2007). Radionuclide discharges to sewer-a field investigation. Science Report SC020150, Environmental Agency UK.
- Rose, P. S., Smith, J. P., Cochran, J. K., Aller, R. C., & Swanson, R. L. (2013). Behavior of medically-derived ¹³¹I in the tidal Potomac River. *Science of the Total Environment*, 452-453, 87-97.
- Rose, P. S., Swanson, R. L., & Cochran, J. K. (2012). Medically-derived ¹³¹I in municipal sewage effluent. *Water Research*, 46(17), 5663-5671.
- Ruchhoft, C. C., & Feitelberg, S. (1951). Estimates on concentration of radio-iodine in sewage and sludge from hospital wastes. *Nucleonics*, 9(6), 29-34.
- Smith, J. P., Oktay, S. D., Kada, J., & Olsen, C. R. (2008). Iodine-131: a potential short-lived, wastewater-specific particle tracer in an urbanized estuarine system. *Environmental Science & Technology*, 42(15), 5435-5440.
- Sodd, V. J., Velten, R. J., & Saenger, E. L. (1975). Concentrations of the medically useful radionuclides, technetium-99m and iodine-131 at a large metropolitan waste water treatment plant. *Health Physics*, 28(4), 355-359.
- Waller, E. J., & Cole, D. (1999). An environmental radionuclide baseline study near three Canadian naval ports. *Health physics*, 77(1), 37-42.
- Warsh, K., Buddemeier, R., Wood, W., & Smith, C. (1988). Radioiodine in kelp from western Australia. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 123(1), 199-213.