

우라늄(Uranium)의 한강수계내 분포와 정수처리 공정별 거동 특성

정관조[†] · 김덕찬* · 박 현 · 오세종

서울특별시 상수도연구소 · *서울시립대 화학공학과

(2004년 11월 22일 접수, 2005년 3월 14일 채택)

Distribution of Uranium in the Han River and Behavior through the Water Treatment Process

Gwan-Jo Jeong[†] · Dok-Chan Kim* · Hyeon Park · Sea-Jong Oh

Waterworks Research Institute, Seoul Metropolitan Government · *Department of Chemical Engineering, The University of Seoul

ABSTRACT : This research was focused on the distribution of Uranium-238 concentration in the Han River. Also, six water treatment plants in Seoul have been investigated to find out the behaviour and the removal capability of uranium. The uranium concentrations were ranged 0.02~0.54 µg/L in the Han River. The relationship between conductivity and total dissolved solids shows that uranium concentration is positively related with conductivity and total dissolved solids. In addition, it has been founded that there was no relevance between uranium concentration and geological structure, because most of the sampling area are Banded Gneiss.

The average uranium concentration in six water treatment plants was determined to 0.134 µg/L in raw water, 0.050 µg/L in coagulated water, 0.029 µg/L in settled water, 0.020 µg/L in filtered water, 0.019 µg/L in finished water. After filtration in the treatment process, uranium concentration level was maintained lower than 0.029 µg/L.

The average uranium removal efficiency compared to the raw water was 63% after coagulation, 15% after sedimentation, 8% after filtration and disinfection. The analysis shows that 78% of uranium in the raw water was removed during coagulation and sedimentation processes. However, 8% of that was removed through filtration and chlorination processes.

Key Words : Uranium-238, Total Dissolved Solids, Conductivity, Water Treatment Process

요약 : 본 연구에서는 지표수 중의 자연적 방사성핵종인 Uranium-238에 대해 서울시 한강·팔당 상수원수와 정수 중의 존재량을 조사하고, 서울시 6개 정수장 정수처리 공정별 우라늄의 거동 및 제거 특성에 대하여 조사하였다.

분석 결과, 한강수계의 우라늄 농도는 0.02~0.54 µg/L의 범위로 나타났다. 시료 내에 존재하는 총용존성고형물의 양, 전기전도도와 우라늄 농도 사이의 상관관계를 분석한 결과, 정수의 경우를 제외하고 총용존성고형물의 양과 전기전도도가 증가하면 우라늄 농도가 증가하는 것으로 나타났다. 또한 지질구조의 구성에 따른 우라늄 농도 분포를 조사한 결과, 조사대상 지역이 대부분 호상편마암 지역으로 우라늄 농도와 상관관계가 없는 것으로 나타났다.

6개 정수장 공정별 평균 우라늄 농도는 원수 0.134 µg/L, 응집수 0.050 µg/L, 침전수 0.029 µg/L, 여과수 0.020 µg/L, 정수 0.019 µg/L로 여과공정 이후의 우라늄 농도는 최대 0.029 µg/L 이하의 낮은 수준을 유지했다.

원수 대비 공정별 평균 우라늄 제거율은 응집공정에서 63%, 침전공정에서 15%, 여과·소독공정에서 8%로 나타났으며, 원수 대비 78%가 응집·침전공정에서 제거되었으며 8%가 여과·소독공정에서 제거됨을 알 수 있었다.

주제어 : Uranium-238, TDS, 전기전도도, 정수처리 공정

1. 서 론

방사성물질은 자연적인 발생원과 인위적인 발생원 등 여러 가지 근원으로부터 환경에 유입될 수 있다. 자연적인 발생원은 대기권의 우주선(cosmic rays)에 의해 만들어진 방사성핵종과 암석, 토양에 존재하는 Uranium-238과 이것의 딸핵인 Radium-226, Radon-222 등이 있다. 인위적인 발생원은 핵연료 사이클과 농업, 의약산업 등 여러 가지 인간 활동 의해 발생된 방사성물질로 지표수나 지하수에 유

입되어 자연적 방사성핵종의 농도를 증가시킬 수 있다.¹⁾ 먹는물로 사용하는 지표수나 지하수 모두 그 농도는 다르지만 자연방사성핵종을 포함하고 있으며 그 농도는 매우 낮다. 지표수에 존재하는 방사성물질은 인간의 활동에 의해 발생하는 인위적인 방사성물질로 국한되며, 지하수 속의 방사성물질 농도는 지질조건과 화학적 성분에 의해 결정되는 것으로 알려져 있다. 즉, 화강암과 인회석, 석회암, 갈탄 그리고 화강암 대수층 등에서 높은 농도를 나타내는 것으로 보고되고 있다.²⁻⁴⁾

우라늄은 천연(天然)으로 존재하는 원소 중에서 가장 무거운 방사능 원소이며 천연 우라늄은 질량수 234 [존재량 0.005%], 235 [존재량 0.72%], 238 [존재량 99.275%]의

[†] Corresponding author

E-mail: jgjwater@yahoo.co.kr

Tel: 02-2049-1071

Fax: 02-2049-1013

세 가지 동위원소로 이루어져 있다.⁵⁾ 우라늄은 지하수와 지표수 모두에서 발견되며 주로 지하수에서 높은 농도를 나타낸다. 화강암과 인회석, 변성암류, 갈탄 그리고 인산염 광산 등이 우라늄을 함유하고 있으며 자연 상태에서 보통 산화상태로 존재하고 U^{3+} , U^{4+} , V가인 UO_2^+ 및 VI가인 UO_2^{2+} 의 4종류 형태로 존재한다. 또한 자연계에서 VI가의 우라늄이 가장 흔하며 보통 산소와 결합하여 우라닐이온(UO_2^{2+})으로 존재한다. 먹는물에서는 낮은 우라늄 농도도 관심의 대상이 되며, 안전성의 목적을 위해 U.S. EPA는 먹는물 중의 우라늄 농도를 30 $\mu\text{g/L}$ 이하로 규제하고 있다.

외국의 경우 먹는물로 사용되는 지하수에서의 우라늄 농도는 프랑스 0.77~23.1 $\mu\text{g/L}$, 슬로베니아 0.09~4.01 $\mu\text{g/L}$, 소련 462~962 $\mu\text{g/L}$ 의 범위로 검출되는 것으로 보고되고 있으며, 조사지역의 지질조건과 화학적 성분에 따라 다양한 농도로 나타나고 있다.⁶⁾

국내의 경우 1994년부터 1995년까지 2년에 걸쳐 환경부 주관으로 한국지질자원연구원(한국자원연구원)과 한국기초과학지원연구원에서 지각의 암석과 토양에 우라늄 농도가 비교적 높은 육천계 지질구조를 갖는 대전, 충북지역 지하수와 먹는샘물에 대해 우라늄 농도 분포를 조사하였으며, 상당수의 시료에서 U.S. EPA의 먹는물 중의 우라늄 농도 기준 30 $\mu\text{g/L}$ 이상으로 검출되었다고 보고된 바 있다. 또한 1999년부터 2002까지 4년에 걸쳐 환경부와 한국지질자원연구원에서 서울시를 제외한 전국의 지하수와 먹는샘물에 대해 우라늄 함유실태조사를 실시했으며, 우라늄 농도는 0.01~400 $\mu\text{g/L}$ 범위로 검출되었다.

서울의 상수원은 한강과 팔당호이며 상수원의 북부지역인 의정부, 포천군, 가평군 지역과 북동부지역인 춘천지역, 남동부지역인 남한강 본류의 여주, 이천지역은 우라늄 농도와 관련이 있는 화강암류 지역으로 구성되어 있으며, 대부분 호상편마암과 편암류, 미그마타이트질 편마암으로 구성된 지질구조적 형태를 나타낸다.⁷⁾

이와 같이 서울시 상수원의 일부 지역이 우라늄 농도와 관련이 있는 화강암류 지역으로 구성되어 있고, 상수원 주변지역에서 사용되는 인광석을 주원료로 제조된 인산비료의 사용과 미량의 우라늄을 함유한 각종 유·무기물질의 유입에 따라 한강·팔당 상수원과 서울시 정수의 우라늄 농도 또한 다를 것으로 예상된다.

이에 본 연구에서는 서울시의 물 공급원인 한강·팔당 상수원과 정수에 대해 Uranium-238(이하 ^{238}U 또는 Uranium)의 양을 조사하고, ^{238}U 농도와 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있는 지질구조, TDS 및 전기전도도와와의 상관관계를 조사하여 그 발생량 및 발생원인을 분석하며, 응집, 침전, 여과, 소독의 정수처리과정에서 우라늄의 거동 및 제거 특성을 평가하고자 실시하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시료 채취 및 전처리

지표수에 존재하는 우라늄 농도는 대부분 $\mu\text{g/L}$ 수준으로 상당부분이 시료 중의 부유입자 표면과 채취 용기의 표면에 흡착되어 손실될 수 있는 가능성을 고려하였다. 따라서 채취 용기는 polyethylene(PE) 용기를 사용하였고, 우라늄 측정을 위해 현장에서 0.45 μm 여과지를 사용하여 여과한 시료 1 L를 채취한 후 질산(HNO_3 , Merck, Germany)을 사용하여 즉시 pH를 2.0 미만으로 낮추었다. TDS, 전기전도도, 무기이온류 및 무기금속류를 측정하기 위해 0.45 μm 여과지를 사용하여 여과한 500 mL를 각각 채취하였으며 TDS와 전기전도도 및 무기이온류 측정용 시료는 질산처리를 하지 않았다.

2.2. 기간 및 대상

2001년 1월부터 12월까지 1년 동안 분기별(3, 6, 9, 11월)로 Fig. 5의 13 지점에서 채취된 52점의 원·정수 시료를 조사하였다. 이들 중 8점은 서울시 광암, 암사정수장 정수이며, 24점은 서울시 6개 취수장(팔당, 암사, 구의, 자양, 풍납, 강북) 원수이다. 또한 서울시 상수원 중 오염도가 심한 한강 지류천인 왕숙천과 경안천에서 8점의 시료를 채취했고, 북한강수계의 팔당댐 유입지점인 양수에서 4점의 시료를 채취했다. 지질구조면에서 ^{238}U 농도와 밀접한 관련이 있는 것으로 보고된 화강암류 지역인 북한강수계인 가평군 지역의 조종천과 남한강수계의 여주·이천지역의 북하천에서 8점의 시료를 채취하였다. 또한 2003년 6월부터 2004년 6월까지 1년 동안 3회(8, 12, 4월)에 걸쳐 서울시 6개 정수장(광암, 암사, 구의, 뚝도, 영등포, 강북정수장) 정수처리 공정별(원수, 응집지 말, 침전지 말, 여과지, 정수지)로 90점의 시료를 채취하여 응집, 침전, 여과, 소독과정에서 ^{238}U 의 거동 및 제거 특성을 평가하였다.

2.3. 우라늄(Uranium) 농도와 총용존성고형물 및 전기전도도 측정

우라늄(Uranium) 측정 시료는 0.45 μm 여과지로 여과하여 탁질을 제거하였으며 시료내의 이온의 변화와 유기물과의 결합을 방지하기 위해 질산(HNO_3)을 사용하여 pH를

Table 1. ICP-MS Operating Conditions and Parameters

Parameter	Setting/Type
Nebulizer	Meinhard® Type A Quartz
Spray Chamber	Quartz Cyclonic
Nebulizer Ar Gas Flow	1.01 L/min
Auxiliary Ar Gas Flow	1.25 L/min
Plasma Ar Gas Flow	16 L/min
Lens Voltage	6.75 V
ICP RF Power	1250 W
Monitored Ion <i>m/z</i>	^{238}U
Dwell Time	50 ms
Integration Time	1500 ms
RPq	0.25 N/A
Detection limit	3 ng/L

2.0 미만으로 낮추었다. 우라늄 측정을 위해 시판되고 있는 우라늄 표준원액(Spex, 1000 mg/L, USA)을 구매하여 탈이온수(Elga, Bucks, UK, 18.2 MΩ cm⁻¹)를 이용하여 표준용액을 조제하였다. 조제된 표준용액을 사용하여 검량곡선을 작성한 후 0.45 μm 여과지로 여과한 시료를 inductively coupled plasma mass spectrometer(ICP-MS, PerkinElmer, ELAN DRCII, USA)에 주입하여 측정하였다. Table 1에 ICP-MS의 우라늄 분석조건을 요약하여 나타내었다.

또한, 우라늄 농도와 상관성을 조사하기 위해 수질인자로 TDS의 양과 전기전도도를 선택하였고, 모두 전기전도도계(Orion, model 142, Germany)를 사용하여 측정하였다. TDS 중의 무기금속류는 inductively coupled plasma atomic emission spectrometer(ICP-AES, Jobin Yvon, Ultima, France)를 사용하여 측정하였고, 무기이온류는 ion chromatograph(IC, Dionex, DX-300, USA)를 사용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 한강수계의 우라늄(Uranium) 분포 및 특성

3.1.1. 우라늄(Uranium) 함량

채취된 시료에 대해 Table 2와 Fig. 1에 나타난 바와 같이 우라늄은 0.02~0.54 μg/L 농도 범위로 나타났다. 광암, 암사정수장 정수는 0.02~0.03 μg/L(평균 0.02 μg/L), 6개 취수장 원수는 0.07~0.21 μg/L(평균 0.13 μg/L), 양수는 0.02~0.11 μg/L(평균 0.05 μg/L), 조종천은 0.13~0.18 μg/L(평균 0.15 μg/L), 복하천은 0.10~0.12 μg/L(평균 0.12 μg/L)의 범위로 나타났다. 또한 한강 지류천인 왕숙천이 0.14~0.54 μg/L(평균 0.31 μg/L), 경안천이 0.13~0.29 μg/L(평균 0.24 μg/L)의 범위로 다른 지역에 비해 높은 농도로 나타났다.

Table 2. Uranium concentration in the Han River

Sites		Quarts				Ave.
		1st	2nd	3rd	4th	
Finished water	Gwangam	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02
	Amsa	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02
Water intakes	Paldang	0.13	0.08	0.16	0.17	0.14
	Amsa	0.16	0.13	0.07	0.14	0.13
	Guui	0.13	0.11	0.07	0.17	0.12
	Jayang	0.15	0.11	0.15	0.19	0.15
	Pungnap	0.15	0.08	0.10	0.21	0.14
	Gangbuk	0.10	0.13	0.12	0.14	0.12
	Yangsu	0.04	0.11	0.02	0.03	0.05
Wangsuk	0.14	0.27	0.54	0.28	0.31	
Gyeongang	0.13	0.28	0.29	0.25	0.24	
Jojong	0.16	0.14	0.13	0.18	0.15	
Bokha	0.12	0.12	0.10	0.12	0.12	

* In every quarter of the year of 2001.

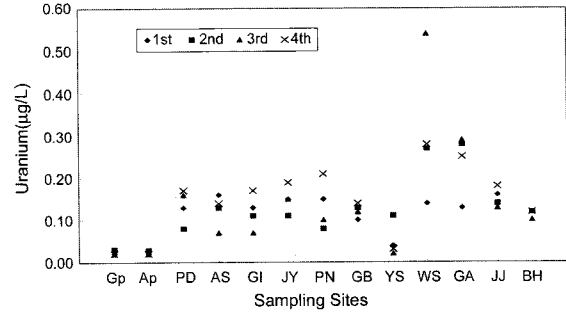


Fig. 1. Concentration of uranium from several branches and intake stations of the Han River.

(GP : Gwangam water treatment plant, AP : Amsa water treatment plant, PD : Paldang intake, AS : Amsa intake, GI : Guui intake, JY : Jayang intake, PN : Pungnap intake, GB : Gangbuk intake, YS : Yangsu main stream, WS : Wangsuk creek, GA : Gyeongang creek, JJ : Jojong creek, BH : Bokha creek)

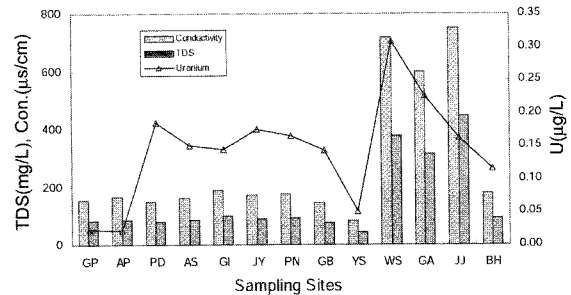


Fig. 2. Correlations among uranium, conductivity and total dissolved solids.

(Con. : conductivity(μs/cm), TDS : total dissolved solids(mg/L), U : uranium(μg/L))

이와 같이 다른 지역에 비해 왕숙천과 경안천에서 높은 농도로 나타나는 것은 왕숙천과 경안천의 경우, 비록 인근 지역에서 방출되는 생활하수나 산업폐수가 하수종말처리장에서 정화되어 방류되거나 다량의 유·무기물질로 다른 지역보다 심하게 오염되어 있으며, 주변지역의 논·밭에 사용하는 인산비료에 함유되어 있는 미량의 우라늄의 유입으로 인하여 다른 지역에 비해 우라늄 농도가 다소 높게 나타나는 것으로 판단된다.^{8~10)}

3.1.2. 우라늄(Uranium) 농도와 총용존성고형물 및 전기전도도 사이의 상관관계

시료 내에 존재하는 TDS의 양과 전기전도도 및 우라늄 농도 사이의 관계를 Fig. 2에 도시하였다.

Fig. 2에 나타난 바와 같이 광암, 암사 정수장 정수를 제외한 다른 지역의 경우 시료내의 TDS의 양과 전기전도도가 증가하면 우라늄 농도가 증가하는 것을 알 수 있다. 즉 왕숙천과 경안천에서 TDS의 양과 전기전도도가 가장 높게 나타나며, 우라늄 농도 또한 가장 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 TDS내에 포함되어 있는 미량의 우라늄에 기인하는 것으로 판단된다. Table 3와 Fig. 3, 4에 우라늄 농도와

TDS의 양, 전기전도도 및 무기물류 농도와와의 상관관계를 나타내었다. 대체로 분석 시료에서 TDS와 전기전도도가 높으면 우라늄 농도도 높으며 이와 같은 사실은 신뢰수준 95%에서 상관계수가 0.4 이상이면 TDS와 전기전도도는 우라늄 농도와 상관관계가 있는 것으로 판단된다.¹¹⁾

정수의 경우, 정수처리공정을 거치면서 대부분의 우라늄이 응집, 침전, 여과, 소독과정에서 제거되어 정수내의 TDS의 양과 우라늄 농도 사이에는 상관관계가 없는 것으로 나타났다.

3.1.3. 우라늄(Uranium) 농도와 지질구조 사이의 상관관계

조사대상인 서울시 상수원의 지질학적 다양성으로 환경

Table 3. Correlation coefficients and the nature of correlation for uranium measurements with different physico-chemical parameters in raw water samples

physico-chemical parameters	Correlation coefficient	Nature of correlation
TDS	0.40	Positive
Conductivity	0.40	Positive
Zinc	0.45	Positive
Calcium	0.53	Positive
Magnesium chloride	0.11	Weak positive
Nitrate-nitrogen	0.43	Positive
Sulfate	0.25	Weak positive
Iron	0.19	Weak positive
Strontium	0.26	Weak positive
	0.45	Positive

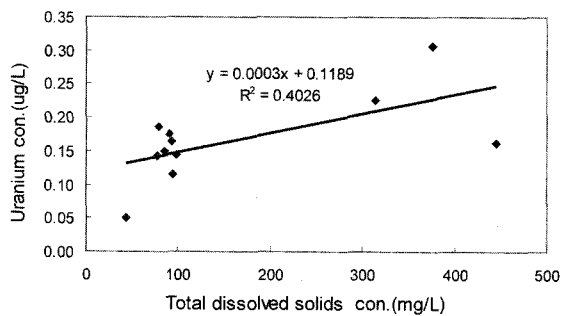


Fig. 3. Uranium concentration vs. total dissolved solids content in raw water samples.

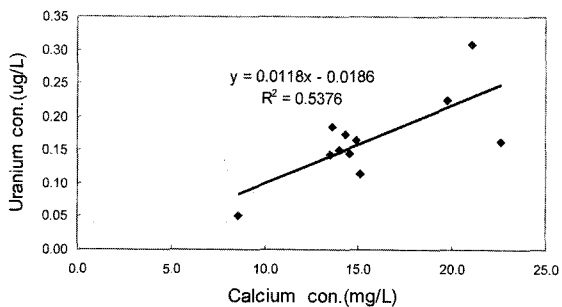


Fig. 4. Uranium concentration vs. calcium content in raw water samples.

에 따른 우라늄의 분포 또한 다를 것으로 예상된다. 서울시 상수원은 대부분 호상편마암(banded gneiss)과 편암(schists)류, 미그마타이트질 편마암(migmatitic gneiss)으로 구성된 지질구조적 형태를 나타낸다. 지질구조면에서 우라늄 농도와 깊은 관련이 있는 화강암(granites) 지질구조로 형성된 지역은 남한강수계인 북한천과 북한강수계인 조종천 뿐이다. 본 연구의 조사대상 지역인 한강수계의 지질구조를 Fig. 5에 나타내었다.

조사 결과, Fig. 6에 나타낸 바와 같이 화강암 지질구조 지역인 조종천과 북한천의 우라늄 평균 농도는 각각 0.15, 0.12 µg/L이고, 호상편마암 지역인 6개 취수장 평균 농도는 0.13 µg/L 그리고 편암(schists) 지역인 북한강수계의 양수의 평균 농도는 0.05 µg/L로 지질구조의 구성 성분에 따라 우라늄 농도가 크게 변하는 지하수와는 달리 지표수의 경우 지질구조면에서 우라늄 농도와 상관관계가 없는 것으로 나타났다.

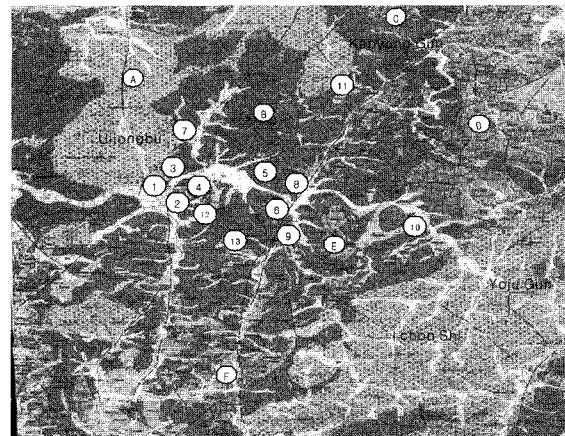


Fig. 5. Geological location of sampling points in the Han River.

- (A) : Granites, (B) : Banded Gneiss, (C) : Migmatitic Gneiss,
- (D) : Gneisses, (E) : Leucocratic Gneiss, (F) : Schists, (1) : Jayang intake, (2) : Pungnap intake, (3) : Guui intake,
- (4) : Amsa intake, (5) : Gangbuk intake, (6) : Paldang intake, (7) : Wangsuk creek, (8) : Yangsu main stream,
- (9) : Gyeonggan creek, (10) : Bokha creek, (11) : Jojong creek, (12) : Amsa water treatment plant, (13) : Gwangam water treatment plant)

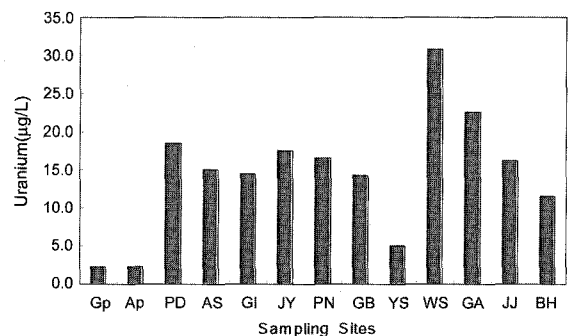


Fig. 6. The concentration distribution of uranium from several points of the Han River.

3.2. 정수처리 공정별 우라늄(Uranium)

3.2.1. 정수처리 공정별 우라늄(Uranium) 함량

2003년 6월부터 2004년 6월까지 1년 동안 3회(8, 12, 4월)에 걸쳐 서울시 6개 정수장(광암, 암사, 구의, 똑도, 영등포, 강북정수장) 정수처리 공정별(원수, 응집지 말, 침전지 말, 여과지, 정수지)로 90점의 시료를 채취하여 응집, 침전, 여과, 소독과정에서 ²³⁸U의 거동 및 제거 특성을 평가한 결과는 Table 4와 같다.

시료 채취 시 6개 정수장 정수의 잔류염소 농도 범위는 0.75~1.0 mg/L이었고 폴리염화알루미늄(polyaluminiumchloride, PACl)은 6.8~26 mg/L, 분말활성탄(powdered activated carbon, PAC)은 2~5 mg/L의 농도 범위로 투입되고 있었다.

우라늄 농도의 계절적인 경향을 평가하기 위해 여름철인 8월과 겨울철인 12월, 봄철 갈수기인 4월에 시료를 채취하여 분석하였으며 Table 4에 나타난 바와 같이 계절별 6개 정수장 공정별 우라늄 농도 변화는 일정한 경향이 없었다.

정수장별 원수의 우라늄 농도는 강북정수장 원수에서 0.09~0.117 µg/L의 범위로 다른 정수장 원수에 비해 낮게 나타났으며, 이것은 원수 취수장이 상류에 위치하여 한강 하류 지류천에서 유입되는 미량의 우라늄을 포함한 오염물질의 영향을 적게 받는 것으로 판단된다. 그러나 광암정수장 원수의 경우, 취수장이 최상류에 위치한 팔당 원수입에

도 불구하고 우라늄 농도는 0.130~0.153 µg/L로 높게 나타났으며 이것은 팔당 취수장 위치가 다량의 유·무기물질로 오염이 심한 경안천에 근접하여 경안천에 함유된 미량의 우라늄의 유입으로 다소 높게 나타나는 것으로 판단된다.

6개 정수장 공정별 우라늄 농도는 원수에서 0.090~0.159 µg/L(평균 0.134 µg/L), 응집수에서 0.026~0.075 µg/L(평균 0.050 µg/L), 침전수에서 0.020~0.043 µg/L(평균 0.029 µg/L), 여과수에서 0.016~0.029 µg/L(평균 0.020 µg/L)의 범위로 나타났다. 최종 생산된 정수에서는 0.013~0.024 µg/L(평균 0.019 µg/L)의 농도로 U.S. EPA 먹는물 중의 우라늄 농도 규제치 30 µg/L에 훨씬 못 미치는 낮은 농도로 나타났다.

3.2.2. 정수처리 공정별 우라늄(Uranium) 제거 특성

Fig. 7은 서울시 6개 정수장 공정별로 3회에 걸쳐 분석한 평균 우라늄 농도를 도시한 것이다.

Fig. 7에 나타난 바와 같이 6개 정수장 모두 응집, 침전, 여과, 소독공정 중 응집공정에서 우라늄의 제거율이 가장 높게 나타남을 알 수 있다. 이것은 응집지에서 우라늄을 포함하는 TDS가 정수약품(PACl)과 반응하여 상당량 응집·침전하여 우라늄 제거율이 높은 것으로 추정된다. Table 4와 같이 원수 대비 공정별 평균 우라늄 제거율은 응집공정에서 63%, 침전공정에서 15%, 여과·소독공정에서 8%로 응

Table 4. Uranium concentration at the individual water treatment process

Process	Purification plant	Gwangam		Amsa		Guui		Ttukdo		Yeongdeungpo		Gangbuk	
		Conc.	RE(%)	Conc.	RE(%)	Conc.	RE(%)	Conc.	RE(%)	Conc.	RE(%)	Conc.	RE(%)
Raw water	#1	0.130		0.100		0.149		0.139		0.159		0.090	
	#2	0.153		0.154		0.125		0.153		0.125		0.111	
	#3	0.146		0.140		0.121		0.152		0.141		0.117	
	Ave.	0.143	-	0.131	-	0.132	-	0.148	-	0.142	-	0.106	-
Coagulated water	#1	0.075		0.029		0.047		0.054		0.041		0.040	
	#2	0.049		0.074		0.054		0.053		0.053		0.074	
	#3	0.033		0.041		0.026		0.072		0.043		0.038	
	Ave.	0.052	63	0.048	63	0.042	68	0.060	60	0.046	68	0.051	52
Settled water	#1	0.029		0.020		0.028		0.029		0.026		0.027	
	#2	0.029		0.031		0.039		0.031		0.030		0.029	
	#3	0.024		0.030		0.023		0.043		0.030		0.026	
	Ave.	0.027	81	0.027	79	0.030	77	0.034	77	0.029	80	0.027	74
Filtered water	#1	0.021		0.017		0.019		0.018		0.019		0.016	
	#2	0.021		0.024		0.022		0.020		0.024		0.019	
	#3	0.017		0.025		0.016		0.029		0.017		0.019	
	Ave.	0.020	86	0.022	83	0.019	86	0.022	85	0.020	86	0.018	83
Finished water	#1	0.019		0.016		0.017		0.017		0.019		0.014	
	#2	0.021		0.024		0.021		0.019		0.021		0.019	
	#3	0.017		0.022		0.013		0.024		0.018		0.015	
	Ave.	0.019	87	0.021	84	0.017	87	0.020	87	0.019	86	0.016	85

* RE : Removal efficiency(%)

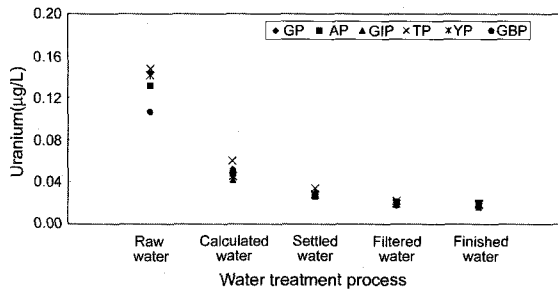


Fig. 7. Uranium concentration from individual water treatment process.

(GP : Gwangam water treatment plant, AP : Amsa water treatment plant, GIP : Guui water treatment plant, TP : Tutkdo water treatment plant, YP : Yeongdeungpo water treatment plant, GBP : Gangbuk water treatment plant)

집·침전공정에서 78%가 제거되었고 8%가 여과·소독공정에서 제거됨 알 수 있었으며 여과공정과 소독공정의 우라늄 농도 변화는 거의 없었다. 이와 같이 서울시 6개 정수장 모두 응집, 침전, 여과, 소독공정을 거치면서 원수에 함유되어 있는 우라늄의 약 84~87%(평균 86%)의 제거효율을 나타냈다. 또한 각 정수장별 활성탄 투입량과 우라늄 제거율 사이의 상관관계를 고려해 볼 때 활성탄 농도 5 mg/L 처리까지는 우라늄 제거율과 PAC 주입율 사이에 유의한 상관관계를 나타내지 않았다.

4. 결론

한강수계에서 우라늄 농도는 0.02~0.54 µg/L의 농도 범위인데 비해 한강 지류천인 왕숙천에서 0.14~0.54 µg/L(평균 0.31 µg/L), 경안천에서 0.13~0.29 µg/L(평균 0.24 µg/L)의 범위로 다른 지역에 비해 높은 농도로 나타났다. 이것은 왕숙천과 경안천의 경우 인근 지역에서 유입되는 다량의 생활하수나 산업폐수 중에 함유된 미량의 우라늄의 유입으로 다른 지역에 비해 우라늄 농도가 다소 높게 나타나는 것으로 판단된다.

시료 내의 TDS 양과 우라늄 농도 사이의 상관관계를 조사한 결과, 일부 외국의 사례와 같이 유의한 상관관계가 있는 것으로 나타났으며, 지질구조의 경우 조사대상 지역인 한강수계가 대부분 호상편마암(banded gneiss) 지질구조로 우라늄 농도에 미치지 영향은 없는 것으로 나타났다.

서울시 6개 정수장 공정별 평균 우라늄 농도와 제거 특성을 조사한 결과, 우라늄 농도는 원수 0.134 µg/L, 응집수 0.050 µg/L, 침전수 0.029 µg/L로 나타났으며, 여과·소독 공정 이후의 정수는 0.019 µg/L의 낮은 농도를 유지했다. 또한 응집공정에서 우라늄의 제거율이 가장 높게 나타났으며 이것은 응집지에서 미량의 우라늄을 포함하는 TDS가 정수약품(PAC)과 반응하여 상당량 응집·침전하여 우라늄 제거율이 높은 것으로 추정된다. 원수 대비 공정별 평균

우라늄 제거율은 응집공정에서 63%, 침전공정에서 15%, 여과·소독공정에서 8%로 78%가 응집·침전공정에서 제거되었으며 8%가 여과·소독공정에서 제거됨을 알 수 있었으며, 서울시 6개 정수장 모두 응집, 침전, 여과 소독공정을 거치면서 원수에 함유되어 있는 우라늄의 약 84~87%(평균 86%)의 제거 효율을 나타냈다.

참고문헌

- Kim, S. M., Jang, A., Lee, J. U., Choi, H. C., Kim, K. W., and Kim, I. S., "Uranium removal from uranium-bearing black shale by bioleaching using an iron-oxidizing bacterium," *J. of KSEE*, **24**(12), 2129~2138 (2002).
- Duenas, C., Fernandez, M. C., Liger, E., and Carretero, J., "Natural radioactivity levels in bottled water in Spain," *Water Res.*, **31**(8), 1919~1924(1997).
- Bakac, M., Kumru, M. N., "Uranium, radium and field measurements in the water of Gediz River," *Turk J. Engin. Environ. Sci.*, **24**, 229~236(2000).
- U, Z. K., Song, K. J., and Kim, T. S., "Uranium levels in soil and plant, and estimation of its intake by the residents at the uranium deposited area," *Agric. Chem., Biotechnol.*, **22**(4), 221~225(1979).
- Ortega, X., Valles, I., and Serrano, I., "Natural radioactivity in drinking water in Catalonia(Spain)," *Environ. int.*, **22**(1), S347~S354(1996).
- Othman, I., Yassine, T., "Natural radioactivity of drinking water in the southern and middle parts of Syria," *Environ. int.*, **22**(1), S355~359(1996).
- 이병주, 김유봉, 이승렬, Explanatory note of the Seoul-Namchonjeom sheet, 과학기술부, pp. 10~34(1999).
- Uyanik, A., Tinkilic, N., Odabasoglu, M., Karaca, H., "Spectrophotometric determination of uranium in water of phosphoric acid and fertilizer manufacturing process," *Turk J. Chem.*, **23**, 275~284(1999).
- Al-Shawi, A. W., Dahl, R., "Determination of thorium and uranium in nitrophosphate fertilizer solution by ion chromatography," *J. Chromatogr.*, **A 706**, 175~181(1995).
- Yamazaki, I. M., Geraldo, L. P., "Uranium content in phosphate fertilizers commercially produced in Brazil," *Appl. Radiat. Isot.*, **59**, 133~136(1995).
- Singh, S., Rani, A., Mahajan, R. K., and Walia, T. P., "Analysis of uranium and its correlation with some physico-chemical properties of drinking water samples from Amritsar, Punjab," *J. Environ. Monit.*, **5**, 917~921(2003).