

# 건강위해성 평가에 의한 정수용 수처리제의 불순물 관리 기준 설정 방법에 관한 연구

정 용 · 백영석<sup>\*\*</sup> · 권동식<sup>\*</sup> · 이기공<sup>\*</sup> · 강형석<sup>\*\*</sup>

연세대학교 의과대학 예방의학교실

<sup>\*</sup>한국환경수도연구소

<sup>\*\*</sup>국립환경연구원

## A Study on the Management Criteria of Chemical Impurities for Drinking Water Treatment by Risk Assessment

Yong Chung · Young-seog Beck<sup>\*\*</sup> · Dong-sik Kwon<sup>\*</sup> · Ki-gong, Lee<sup>\*</sup> · Hyeong-seok Kang<sup>\*\*</sup>

Department of Preventive Medicine, College of Medicine Yonsei University, Seoul

<sup>\*</sup>Korea Environment & Waterworks Institute, Seoul

<sup>\*\*</sup>National Institute of Environmental Research, Incheon

(Received 3 May 2004, Accepted 12 July 2004)

**Abstract** : The principle and methodology of risk assessment was applied to establish the quality standard of potential impurities of drinking water treatment chemicals. The impurities(arsenic, lead, cadmium, chromium, mercury, etc.) are regulated as the contained quantity of chemicals in Korea while they are regulated as the quality standard with the idea of 10% of the national safety drinking water standard in U.S.A(NSF) and Japan(JWWA).

According to risk assessment of the current standard implemented in Korea, the excess cancer risk of arsenic and lead were determined in around  $10^{-5}$  and the hazard quotient(HQ) of cadmium and chromium were below  $10^{-2}$ , respectively. And the standard concentration of the impurities are regulated as much as 2%~6% of the national drinking water quality standard. The values are more enforced rather than the standards in U.S.A(NSF) and Japan(JWWA) regulating the concentration of impurities the 10% of the national drinking water quality standard.

We conclude that the impurities standard of drinking water treatment chemicals should be reconsidered comprehensively concerning the national safety drinking water quality standard and risk assessment.

**keywords** : Risk assessment, Impurities; Excess cancer risk, Hazard quotient(HQ), Drinking water treatment chemicals

### 1. 서론

수돗물의 정수에서는 원수중에 함유된 오염물질을 처리하기 위해 응집·침전, 살균·소독, 여과 과정이 수반되며, 이때 사용하는 약품이 수처리제이다. 수처리제는 용도에 따라 응집제, 살균·소독제, pH 조정제 등으로 구분하고 있으며, 우리나라는 1990년 이전까지는 응집제인 황산알루미늄, 폴리염화알루미늄, 염소 등 6종에 불과하였다(국립환경연구원, 1999). 그러나 상수원수의 수질이 악화되고 각종 수돗물 오염사고도 빈발하여 오존, 활성탄과 같은 고도정수처리가 요구되고 있으며, 이에 따라 현재, 환경부 고시로 응집제 9종, 살균·소독제 5종, 방청제 1종, 기타 9종 등 총 24종의 수처리제가 지정되어 있다(환경부, 2004). 정수장에서 이들 수처리제 구입에 2002년도에 약 323억원이 지출되었으며(환경부, 2002), 각 품목별 사용량과 비용을 보면 Table 1과 같이 년도별로 차이가 있으나, 응집제가 가장

많고, 그 다음 살균소독제, 수산화칼슘, 활성탄 순이다(국립환경연구원, 1999).

한편 수처리제의 품질 기준 항목은 품목에 따라 차이가 있으나, 무기물질의 경우 암모니아성질소, 철, 비소, 납, 카드뮴, 크롬, 망간, 셀레늄, 수은 등이며, 유기물질은 폴리아민에 대하여 에피클로로히드린, 총클로로프로판올의 함량기준이 정해져 있다. 주요 수처리제의 불순물 농도를 보면, Table 2에서와 같이 각 품목별로 불순물의 함량을 제한하는 것으로 설정하고 있다. 그러나 수처리제는 식품과 달리 제품 자체를 직접 섭취하는 것이 아니고 미량인 정수과정에서 투입되기 때문에 우리나라와 같이 제품의 함량 기준으로 불순물을 관리하는 것은 실제로 수돗물에 주입되는 수처리제의 농도를 고려하고 있지 않은 문제점이 있다. 또한 동일 품목의 수처리제에서 각 중금속의 함량 기준이 먹는물수질기준 농도와 상관성이 없이 설정되어 있어 중금속에 따라 각기 다른 위해성을 갖고 있다.

수처리제 불순물 기준에 대하여 외국의 사례를 보면, 미국 NSF(NSF, 1988)와 일본 후생성(JWWA, 2002)에서는 정수과정에서 투입되는 각 수처리제의 최고 주입율을 고려

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
bys01@kewi.re.kr

**Table 1.** The yearly cost and quantity of the water treatment chemicals in Korea

units : ton, (billion won)						
Year	Total	Coagulant	Disinfectant	Calcium hydroxide	Activated carbon	Sodium hydroxide
1992	130,707	101,448	19,410	5,853	3,157	839
1993	128,876	103,662	14,981	6,462	3,120	651
1994	141,411	111,876	18,183	5,767	5,077	508
1995	161,044 (28.1)	127,335 (16.1)	24,246 (8.2)	3,760 (0.3)	4,312 (3.4)	1,391 (0.1)
1996	218,147 (35.8)	180,664 (22.7)	24,020 (8.2)	5,414 (4.2)	8,049 (0.7)	-
1998*	1,630,709 (446.9)	1,347,671 (75.7)	119,227 (8.2)	74,611 (31)	1,772 (1.1)	84,678 (0.4)

\* Wastewater treatment chemicals were calculated

**Table 2.** Impurities maximum concentrations of chemicals for drinking water treatment in Korea

(unit : mg/kg)						
Chemical name	Impurity	Impurity				
		Arsenic	Lead	Cadmium	Chromium	Mercury
Polyaluminum chloride		5	10	2	10	0.2
Aluminum sulfate(Solid)		20	20	4	20	0.4
Ferric sulfate		50	50	10	10	2
Calcium hydroxide		5	20	5	50	0.2
Sodium hypochlorite		1	1	1	2	0.2
Activated carbon		2	10	1	-	-
Sodium hydroxide		2	10	2	5	0.2

하여 수돗물에서 검출되는 농도를 먹는물수질기준의 10%로 규정하고 수돗물의 수질 관리가 먹는물수질기준과 통합적으로 관리되고 있어 먹는물수질기준이 강화되면, 수처리제의 품질도 동시에 강화되는 유연성을 갖고 있다.

이와같이 우리나라의 현행 수처리제에 대한 환경부 고시 기준을 먹는물수질기준과 연계하여 과학적인 근거로 재평가할 필요가 있으며, 특히 불순물에 의한 인체 위해성 평가 기법을 적용하여 적절한 기준 설정이 요구된다.

위해성(risk)이란 유해물질의 특정농도나 용량(dose) 또는 유해요인(stressor)에 노출된 개인이나 집단, 생태계에 있어 유해한 결과가 발생할 확률(probability) 또는 가능성(likelihood)으로 정의된다(NRC, 1983). 따라서 위험도(risk value)는 일반적으로 용량(dose) 또는 노출(exposure)의 합수로 표현되어질 수 있다.

위해성 평가는 위험성 확인(hazard identification), 노출 평가(exposure assessment), 용량-반응 평가(dose-response assessment) 및 위해성 결정(risk characterization)의 주요 4 단계를 통해 수행되어진다(NRC, 1991).

본 연구에서는 이러한 위해성 평가 기법을 활용하여 현행 수처리제의 환경부 고시로 규정되어 있는 불순물 함량 기준을 우리나라 정수장에서 최고 주입율을 고려하여 수돗물중에서 발생할 수 있는 농도로 환산하여 건강위해성을 평가하였으며, 향후 수처리제, 수도기자재 등 수돗물의 정

수와 이송 과정에서 발생할 수 있는 유해물질의 안전 기준 설정에 활용 가능성을 검토하였다.

## 2. 연구 방법

수처리제 불순물의 최대 가능 사용량을 산출하고 건강 위해성 평가 과정을 거쳐 발암 위해성 및 비발암 위해성을 분석 평가하였다.

### 2.1. 대상 수처리제와 불순물

위해성 평가 대상 수처리제는 환경부의 현행 수처리제의 기준 및 규격에 해당하고 정수장에서 주로 사용되고 있는 분말활성탄(powder activated carbon), 폴리염화알루미늄(polyaluminum chloride), 소석회(calcium hydroxide), 가성소다(sodium hydroxide)를 대상으로 하였으며, 불순물은 함량 기준으로 설정되어 있는 비소, 납, 카드뮴, 크롬으로 하였다.

### 2.2. 위해성 평가

위해성 평가는 인체 발암 위해성 및 비발암위해성에 대하여 미국 EPA에서 설정한 방법에 따라 위험성 확인, 용량-반응평가, 인체 노출량 평가 및 위험도 평가 단계로 다음과 같은 과정으로 수행하였다.

2.2.1. 위험성 확인 및 독성 평가

비소, 납, 카드뮴, 크롬 등 수처리제 기준 및 규격에 규정되어 있는 5종의 중금속에 대한 위험성 확인(hazard identification)을 하였으며, 미국 EPA의 IRIS 자료를 이용하였다.(Integrated Risk Information System, 2002)

2.2.2. 용량반응평가

발암물질로 분류된 연구대상물질에 대한 발암력(cancer potency)과 단위 위험도(unit risk), 비발암성 물질의 참고치(reference dose(RfD))는 IRIS 최신 자료(US. EPA, 2002)를 이용하였다.

2.2.3. 인체 노출량 평가

293개의 전국 시단위 정수장에 설문 조사를 실시하여 2001년 9월부터 2002년 10월까지 월별 수처리제 종류별 최대 주입농도를 구하였으며, 각 수처리제별로 가장 높은 주입농도를 인체 노출량 산정을 위한 값으로 적용하였다. 최고 농도로 투입된 수처리제에 함유되어 있는 불순물들은 처리과정중에 제거되지 않는다고 가정하여 오염농도로 환산하였다. 계산된 오염농도에 대하여 경구에 의한 단일경로만을 고려하여 1일 먹는물로 2리터를 섭취하고 일반인 체중을 평균 60kg으로 계산하였으며, 이들 값을 이용하여 인체 노출량을 산정하여 위험도를 추계하는데 이용하였다.

2.2.4. 위험도 평가

위험도 결정(risk characterization)은 위험성이 확인된 물질에서 노출 평가 결과와 용량-반응 평가를 조합하여 실행하게 되는데 발암물질은 불순물별 인체 노출량에 발암력을 곱하여 초과발암위험도(excess cancer risk)를 산정하였다. 또한 비발암 물질에 대하여는 참고치(RfD)와 비교하여 위험quotient(HQ))을 산출하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 위험성 확인

미국 EPA의 IRIS의 자료 검색 결과 연구 대상 물질중에서 비소(arsenic)는 인간에게 발암물질로 확인된 물질분류로 A군에 속하고, 납(lead)은 사람에게 있어서 유력한 발암물질(B2)로 확인되었다. 인간에게 발암성이 있다고 인정되는 물질은 A군에 속하며, 인간에게는 확증은 없으나 동물등의 실험에 의하여 발암성이 입증된 것으로 인간에게도 발암위험성이 높은 물질인 B군에 속하는 것이다.

6가 크롬(chromium(VI))과 카드뮴(cadmium)은 사람에게 있어 발암성을 확정할 수 없는 D군에 속하는 물질로 확인되었다.

3.2. 용량반응평가

발암물질로 분류된 연구대상물질에 대한 발암력(cancer potency)과 단위위험도(unit risk)는 Table 3과 같으며, 비발암성 물질의 참고치는 Table 4와 같다. 일반적으로 안전한 위험도 수준을 10<sup>-5</sup>로 간주하나 통상적으로 미국 EPA에서는 먹는물중 화학물질로 기인한 초과발암 위험도를 10<sup>-5</sup>~10<sup>-6</sup> 정도의 위험도에서 허용 가능한 수준으로 받아들이며, 이 범위내에서 기준을 설정하게 된다(서울특별시, 1994).

Table 3. Cancer potency and unit risk of chemicals

Carcinogen	Cancer potency(mg/kg/d) <sup>-1</sup>	Unit risk (μg/L) <sup>-1</sup>
Lead	3.9×10 <sup>-2</sup>	1.3×10 <sup>-6</sup>
Arsenic	1.5	5.0×10 <sup>-5</sup>

(Reference : US. EPA, IRIS, 2002)

Table 4. RfD of chemicals

Non carcinogen	Reference dose(RfD) (mg/kg/d)
Chromium(VI)	3×10 <sup>-3</sup>
Cadmium	5×10 <sup>-4</sup>

(Reference : US. EPA, IRIS, 2002)

3.3. 인체 노출량

수처리제 사용에 따른 발암성 및 비발암성 물질의 인체 노출량을 산정하기 위해 국내 정수장에서 사용되는 수처리제의 주입농도를 파악하였다. 최대 주입농도는 수처리제에 함유한 불순물의 수돗물에서 검출될 수 있는 농도를 예측하는데 필요한 자료가 되는데 국내에 이에 대한 조사 자료가 전무한 실정이다.

이에 이 연구에서는 1년간(2001년 9월부터 2002년 10월 까지)의 전국 각 정수장에서 월별 사용된 수처리제별 최고 주입농도를 조사하여 최고 위험률로써 적용하고자 하였으며, 그 결과는 Table 5와 같이 폴리염화알루미늄 150mg/L, 소석회 60mg/L, 가성소다 100mg/L, 분말활성탄 50mg/L이다. 미국 NSF의 경우 불순물 평가 주입율로 폴리염화알루미늄은 250mg/L, 소석회는 650mg/L, 가성소다는 100mg/L, 분말활성탄은 250mg/L이며, 일본 후생성의 최대 주입율은 폴리염화알루미늄 300mg/L, 소석회 100mg/L, 가성소다

Table 5. Estimated maximum dose of chemicals in drinking water treatment plants in Korea

Chemicals	Polyaluminum chloride	Calcium hydroxide	Sodium hydroxide	Powder activated carbon
Maximum dose (mg/L)	150	60	100	50
Standard deviation	21	12	20	7
Mean (mg/L)	30	11.6	14	5.6
Count (n)	813	147	72	145

**Table 6.** Estimated maximum exposure concentration of chemicals

(unit :  $\mu\text{g/L}$ )

Impurities	Polyaluminum chloride	Sodium hydroxide	Calcium hydroxide	Powder activated carbon	10% of the Standard*
Arsenic	0.75	0.2	0.3	0.10	5.0
Lead	1.5	1.0	1.2	0.50	5.0
Cadmium	0.3	0.2	0.3	0.05	0.5
Chromium	1.5	0.5	3.0	-	5.0

\* 10% concentration of drinking water quality standard concentration in Korea

**Table 7.** Ratio of estimated exposure concentration and national drinking water quality standard in Korea

(unit : %)

Impurities	Polyaluminum chloride	Sodium hydroxide	Calcium hydroxide	Powder activated carbon
Arsenic	1.5	0.4	0.6	0.2
Lead	3.0	1.0	2.4	1.0
Cadmium	6.0	4.0	6.0	1.0
Chromium	3.0	2.0	6.0	-

**Table 8.** Estimated lifetime average daily exposure amount of chemicals

(unit :  $\text{mg/kg/day}$ )

Impurities	Polyaluminum chloride	Sodium hydroxide	Calcium hydroxide	Powder activated carbon	10% of Standard*
Arsenic	$2.5 \times 10^{-5}$	$6.7 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$3.3 \times 10^{-6}$	$1.7 \times 10^{-4}$
Lead	$5.0 \times 10^{-5}$	$3.3 \times 10^{-5}$	$4.0 \times 10^{-5}$	$1.7 \times 10^{-5}$	$1.7 \times 10^{-4}$
Cadmium	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.7 \times 10^{-6}$	$1.7 \times 10^{-5}$
Chromium	$5.0 \times 10^{-5}$	$1.7 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-4}$	-	$1.7 \times 10^{-4}$

\* 10% concentration of drinking water quality standard in Korea

300mg/L, 분말활성탄 100mg/L로 평가하고자 하는 최대 주입을 즉, 최고 위험율은 상대적으로 낮은 값을 알 수 있다.

Table 2의 환경부 고시 불순물 기준 농도에 대하여 설문 조사에 의한 국내 정수장의 수처리제별 최대 주입율을 최고 위험율로 가정하고 수도꼭지에서 검출되는 농도를 추정 산출한 결과는 Table 6과 같다. 각 불순물 종류별로 각 수처리제 종류에 따라 다른 값을 나타내고 있으며, 먹는물수질기준과의 비율도 다르다(Table 7). 즉, 비소의 경우 우리나라 먹는물수질기준이  $50 \mu\text{g/L}$ 인데 각 수처리제에 의한 품목별 함유 가능 농도를 보면 폴리염화알루미늄  $0.75 \mu\text{g/L}$ , 가성소다  $0.2 \mu\text{g/L}$ , 소석회  $0.3 \mu\text{g/L}$ , 분말활성탄  $0.1 \mu\text{g/L}$ 로 먹는물수질기준과의 비율로 보면 Table 7과 같이 PAC 1.5%, 가성소다 0.4%, 소석회 0.65%, 분말활성탄 0.2%로 각기 다른 비율을 가진다. 이 농도는 미국 NSF와 일본 후생성에서 규정하고 있는 먹는물수질기준의 10% 보다 비소는 6배~50배, 납은 3배~10배, 카드뮴은 1.7배~10배, 크롬은 1.7배~10배로 비소의 농도가 상대적으로 낮다.

한편, 계산된 오염농도에 대하여 경구에 의한 단일경로만을 고려하여 일일 먹는물로 2리터를 섭취하고 일반인 체중을 평균 60kg으로 계산한 결과 Table 8과 같다. 인체 노출량을 비교해 보면 가성소다의 비소가 가장 낮은  $6.7 \times 10^{-6}$

$\text{mg/kg/day}$ 를 나타내었고 이에 반해 소석회의 크롬은  $1.0 \times 10^{-4} \text{ mg/kg/day}$ 로 가장 높은 노출량을 나타내었다.

### 3.4. 위해도 평가

발암물질로 분류되는 비소와 납의 각 수처리제의 최고 위험율에 대하여 위해도를 평가한 결과 Table 9에서와 같이 비소는  $10^{-5} \sim 10^{-6}$ (매일 성인이 수처리제로부터 발암성을 유발할 수 있는 확률로서 10만명당 1인 내지 100만명당 1인), 납은  $10^{-6} \sim 10^{-7}$  정도의 최대 초과발암 확률을 나타내어 아주 낮은 위해도를 보였으며, 비소의 위해도가 상대적으로 높게 나타났다. 수처리제 종류에 따라 각기 다른 위해도 값을 나타내었는데 PAC의 위해도가 가장 높고 활성탄의 위해도가 가장 낮았다. 한편, 먹는물수질기준의 비소 위해도가  $2.5 \times 10^{-3}$ , 납의 위해도는  $6.5 \times 10^{-5}$ 인 점을 감안하면 수처리제의 위해도가  $10^{-2}$  정도 낮고, 미국 NSF와 일본 후생성의 기준인 먹는물수질기준의 10%에 비해 낮은 위해도를 보이고 있다.

비발암성 물질의 노출에 따른 위해도 평가는 앞서 용량-반응 평가를 통해 산출된 참고치와의 비교를 통해 산출할 수 있다. 즉 오염물질에 노출량을 평생 동안의 일일 허용량(참고치; RfD)으로 나눈값을 위험값(HQ)이라고 하며 현 오염 수준이 1을 초과하는 경우에는 유해 영향(독성)이 발

**Table 9.** Estimated cancer risk of chemicals

(unit : unitless,  $\times 10^{-5}$ )

Chemicals	Polyaluminum chloride	Sodium hydroxide	Calcium hydroxide	Powder activated carbon
Arsenic	3.75	1.00	1.50	0.50
Lead	0.195	0.130	0.156	0.065

**Table 10.** Hazard quotient(HQ) of non carcinogenic chemicals

(unit : unitless)

Chemicals	Polyaluminum chloride	Sodium hydroxide	Calcium hydroxide	Powder activated carbon
Cadmium	0.02	0.02	0.02	0.003
Chromium	0.02	0.01	0.02	-

생활 가능성을 제시해 주며, 1이하인 경우에는 안전역에 속하는 것이다. 이 연구에서 각 수처리제별 비발암성물질의 HQ는 Table 10에서와 같이 모두 1이하를 나타내어 합량 기준은 안전역에 속함을 알 수 있다. 그러나 각 불순물 종류와 수처리제 종류가 모두 다른 값을 나타내어 유해 영향 정도가 다른 값을 나타내었다.

#### 4. 결론

우리나라 정수장에서 사용하고 있는 주요 수처리제의 주입율을 근거로 환경부의 수처리제 불순물 함량 기준 농도에 대한 건강위해성을 평가한 결론은 다음과 같다.

1. 건강위해성 평가 결과 발암성 물질인 비소의 위해도는  $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 이며, 납의 위해도는  $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 의 초과발암 확률로 아주 낮은 위해도를 보였으며 비소의 위해도가 상대적으로 높게 나타났다. 또한 비발암성 물질의 위험값(HQ; Hazard quotient)은 모두 1이하로 안전역에 속하였다. 각 수처리제 품목별, 불순물 종류별로 위해도에 차이가 있었으며, PAC의 위해도가 가장 높고 활성탄의 위해도가 가장 낮게 나타났다.
2. 현행 환경부의 수처리제 품질 관리 기준은 먹는물수질 기준과의 비율이 0.2%~6%로 미국과 일본의 10%에 비하여 상당히 엄격한 수준이며, 위해도는 먹는물수질기준의  $10^{-2}$ 정도로 낮았다.

이상과 같이 우리나라에서 수처리제의 불순물 관리 기준은 미국, 일본 등 외국에 비해 상당히 엄격한 편이다. 그러

나 수처리제 사용자와 제조자의 품질관리가 미국, 일본에 비해 상대적으로 허술하게 이루어지고 있는 현실에서 당장 불순물 기준을 미국, 일본 등 선진외국에서와 같이 먹는물 수질기준의 10%로 완화하는 것은 수돗물 수질 악화를 초래할 수 있으므로, 향후 품질관리의 제도적 장치를 보다 체계적으로 수립한 후에 건강 위해성 평가 결과를 토대로 수처리제의 불순물 관리 기준을 조정할 필요가 있을 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

국립환경연구원, 수처리제의 품질관리기법 개발에 관한 연구 I (1999).  
 국립환경연구원, 수처리제의 품질관리기법 개발에 관한 연구 II (2000).  
 국립환경연구원, 수처리제의 품질관리기법 개발에 관한 연구 III (2001).  
 서울특별시, 수돗물의 안전성 평가 연구 (1994).  
 환경부, 수처리제의 기준과 규격 및 표시기준 (2004).  
 환경부, 수처리제 관리제도 개선을 위한 연구 (2003).  
 환경부, 상수도통계 (2002).  
 JWVA, JWVA Z109:水道用薬品の評價試験方法 (2002).  
 Nation Research Council, Human exposure assessment in the federal government managing, National Academy Press, Washington D.C. (1983).  
 Nation Research Council, Human exposure assessment for airborne pollutant, Washington D.C. (1991).  
 NSF INTERNATIONAL, NSF 61:Drinking water treatment chemicals (1988).  
 US. EPA, EPA Guidance Manual, IRIS (2002).