

국내 정수장 먹는 물 중 폼알데히드 함유실태 조사 및 위해성 평가 연구

채효진^{1, 2} · 김현구³ · 김승기¹ · 표희수¹ · ★ · 홍종기²

¹한국과학기술연구원 생체대사연구센터,
²경희대학교 기초약학과, ³국립환경과학원 먹는물연구과
(2009. 9. 28. 접수, 2009. 10. 9 승인)

Analysis and risk assessment of formaldehyde in water from water purification plant in Korea

Hyojin Chae^{1, 2}, Hyun Ku Kim³, Seungki Kim¹, Heesoo Pyo¹ · ★ and Jongki Hong²

¹Bioanalysis and Biotransformation Research Center, Korea Institute of Science and Technology
P.O. Box 131, 130-650 Cheongryang, Seoul, Korea

²Department of Pharmaceutical Science, Kyung Hee University, Hoegi-dong,
Dongdaemun-Gu, Seoul 130-701, Korea

³Drinking water division, National Institute of Environmental Research, Environmental Research Complex,
Kyungseo-Dong, Seo-Gu, Incheon 404-170, Korea

(Received September 28, 2009; Accepted October 9, 2009)

요 약: 폼알데히드는 피혁 제조나 사진 건판, 폭약 등을 만들 때 이용되며, 정수장에서 오존 처리시 생성되는 소독 부산물이기도 하다. 노출시 안구 가려움증, 간지러움, 콧물, 코막힘, 두통 등의 증상이 나타나며 목이 건조해지거나 염증이 유발된다. 폼알데히드는 US. EPA에서 호흡으로 흡입할 경우 발암등급 B1으로 분류하는 발암성 물질이다. 본 연구에서는 폼알데히드의 분석을 위해 2,4-dinitrophenylhydrazine (DNPH) 유도체를 만든 후, 고체상 카트리지를 사용하여 추출하였고 High Performance Liquid Chromatography/Diode Array Detector (HPLC/DAD) 로 분석하였다. 검출 한계는 3 µg/L이고, 72.3~109.1% (상대표준편차 2.9~11.5%)의 회수율을 보였다. 1998년도부터 2007년도까지 4대강 수계를 중심으로 채수하여 분석한 결과, 정수에서 검출 빈도 48.8% (630/1291), 5.15~101.9 µg/L의 농도로 검출되었다. 먹는물 음용시 비발암성을 고려한 95 percentile 전국 평균 위험지수는 4.37×10^{-3} 로, 이는 1 이하였으므로 안전한 수준으로 판단하였다.

Abstract: Formaldehyde is used in leather manufacture, a dry plate and an explosive. It is by-product of ozonizing process in filtration plant. The effects of exposure are eye pruritus, tickle, runny nose, blocking nasal passages and headache. It also makes a dried throat and causes inflammation. It is classified as B1 group for inhalation by US. EPA, which can cause cancer in human. For analysis of formaldehyde, formaldehydes-DNPH derivative was extracted with solid cartridge and was analyzed by High Performance Liquid Chromatography/Diode Array

★ Corresponding author

Phone : +82-(0)2-958-5181 Fax : +82-(0)2-958-5059

E-mail : phs3692@kist.re.kr

Detector (HPLC/DAD). The detection limit was 3 µg/L and the recoveries were 72.3~109.1% (RSD 2.9~11.5%). Water samples were collected in four Korean rivers, four times per year seasonally for 10 years from 1998 to 2007. The monitoring results were 48.8% (630/1291), 5.15~101.9 µg/L in purified water. Because of non-carcinogen in drinking water, hazard index is calculated with RfD. Results of excess cancer risk was below 1 and was considered as safe value.

Key words : formaldehyde, 2,4-DNPH, HPLC/DAD, risk assessment, monitoring

1. 서 론

산업이 날로 발전하면서 식수원인 하천수의 오염이 점점 심각해지고 있어 많은 문제를 야기하고 있다. 매일 사용하는 물은 우리의 건강과 직접적인 연관이 되기 때문에 정수처리에 많은 신경을 써야하는 부분이다.

국내에서 가장 오랫동안 사용된 소독방식은 염소 처리 방식이나, 염소처리를 하는 과정에서 유기물과 염소가 반응하여 건강에 위협적인 할로 아세트산, 할로 아세토나이트릴, 할로피크린 등의 염소 소독 부산물이 발생하는 것으로 알려져 있다.¹ 소독 부산물이 포함된 물을 섭취할 경우 그 농도가 낮아 유해한 정도는 아니지만, 장기 섭취시 인체에 축적되어 암 유발 가능성을 높일 수 있다.² 따라서 좀 더 안전한 방식으로, 염소 정수처리를 줄이고 오존 정수처리를 도입한 고도 정수처리방법을 시행하였다. 미국, 일본을 비롯한 선진국에서 먼저 도입한 오존 처리방법은 염소 소독으로 인한 부산물이 발생하지 않을 뿐만 아니라 맛과 냄새의 원인이 되는 유기물을 산화시켜 불쾌감을 없애고, 높은 산화력으로 염소처리보다 살균효과가 매우 높다.³ 우리나라에서는 부산의 화명정수장에 1989년 최초로 오존처리시설이 도입된 이후 여러 정수장에 도입되었다.⁴ 하지만 안전할 것으로 여겼던 오존처리에 의해서도 부산물이 발생하는 것으로 밝혀졌다.⁵ 오존은 휴민 물질과 반응하여 알칸류, 지방족 알데하이드, 케톤 등을 부산물로 발생시키는데⁶ 그 중 폼알데히드는 흡입에 의한 노출 시 발암성이 알려진 물질이다.^{7,8}

폼알데히드는 공기 중의 메탄이나 다른 유기물이 햇빛에 반응하여 산화되어 발생하거나, 미생물에 의해 대사되어 환경 내에 자연적으로도 존재하게 된다.^{9,10} 또한 물속에서도 오존화, 염소화 등의 반응에 의해 폼알데히드가 생성된다.¹¹ 폼알데히드는 피혁제조나 사 진건판, 폭약, 화장품 살균제 등 여러 제조 산업에서 많이 쓰이기 때문에^{10,12} 환경에 노출되기 쉬우며, 산업

에서 중간물질이나 생성물로 생산된 폼알데히드의 양은 자연적으로 발생하는 양보다 훨씬 많다. 폼알데히드에 노출시 안구가려움증, 간지러움, 콧물, 코막힘, 두통 등의 증상이 나타나며 목이 건조해지거나 염증이 유발된다.¹³ 폼알데히드 노출은 피부접촉, 흡입, 섭취에 의해 일어날 수 있으나 주로 흡입을 통해 노출된다고 알려져 있다.^{10,14} US. EPA에 따르면 폼알데히드는 흡입 노출시 B1 발암등급으로 지정되었고,^{7,8} 일본의 수도법에는 감시항목으로 지정되어 수질기준 80 µg/L로 설정되어 있다.¹⁵

알데히드류를 분석하는 방법으로는 물 시료를 liquid-liquid extraction (LLE)로 추출하여 Gas Chromatography/Electron Capture Detector (GC/ECD)로 분석하는 Standard methods 6252¹⁶와 EPA Method 556이 흔히 사용된다.¹⁷ 그 외에 흐름 주입 분석법을 이용하여 염기성 용액 중에서 과산화수소와 반응시키거나^{18,19} 5,5-dimethylcyclohexane-1,3-dione (dimedone)으로 반응시켜²⁰ 화학발광을 측정한다. 또한 pararosaniline법을 수정하여 UV-VIS 분광 광도법으로 측정을 하는 사례가 있다.^{21,22} 유도체화 방법으로 대기 중 폼알데히드를 oxazolidine 유도체를 형성시켜 flame ionization detector (FID) 검출기로 분석하거나,²³ o-(pentafluorobenzyl)-hydroxylamine (PFBHA)와 유도체를 형성시켜 GC/ECD 또는 Gas chromatography/mass spectrometry (GC/MS)로 분석하기도 한다.^{24,25} 다른 유도체화 시약으로는 본 실험에서 사용한 2,4-dinitrophenylhydrazine (DNPH)으로 알데히드-DNPH 유도체를 만들어 농축한 후 측정하거나²⁶⁻²⁸ ZSM-5와 같은 Zeolite, C₁₈ Sep-Pak 카트리지에 농축하여 탈착 후 크로마토그래피로 측정하기도 한다.²⁹ 양이온 교환수지의 설포네이트기가 촉매 역할을 하면서 컬럼 내에서 알데히드-DNPH 유도체를 형성시켜 농축시킨 다음 아세토나이트릴로 탈착시켜 측정하는 방법도 있다.³⁰ 최근에는 fiber를 이용한 solid phase microextraction (SPME) GC/MS 분석법이 많이 연구되고 있다.³¹⁻³³

본 연구에서는 1998년부터 2007년까지 분석결과를 수계별, 계절별로 비교하고, 이를 토대로 수도물 음용에 의한 비발암성에 따른 인체 위해도 평가를 실시하였다.

2. 실험

2.1. 시약 및 기기

2.1.1. 시약

본 연구에서 사용한 폼알데히드 표준물질은 Aldrich 사(Milwaukee, WI, USA)에서 구입하였으며, 유도체화 시약은 TCI사(Tokyo, Japan)의 2,4-DNPH를 사용하였다. 정제수는 시약용 정제수를 사용하거나, 2 L의 증류수를 2 시간 정도 끓여 1 L로 농축 한 후 병 구멍이 작은 유리병에 넣은 다음 마개를 하여 사용하였다. n-Hexane 과 methanol은 B & J사(Muskegon, MI, USA)의 HPLC 급을 사용하였다. 염산은 J.T. Baker사(Phillipsburg, NJ, USA)에서 구입하였고, sodium chloride와 ammonium chloride, citric acid, sodium citrate은 Junsei사(Tokyo, Japan)의 특급시약을 구입하여 사용하였다.

시판되는 폼알데히드(37%) 표준원액을 1000 mg/L로 만든 다음, 0.1 M Na_2SO_3 10 mL에 1000 mg/L 폼알데히드 표준원액을 10 mL 넣은 후 0.1 N HCl로 적정하여 아래의 식으로 정확한 농도를 계산한다.

$$\text{폼알데히드(mg/L) 농도} = \frac{30.03 \times \text{HCl 농도(N)} \times \text{HCl 부피 (mL)}}{\text{폼알데히드 부피 (mL)}}$$

유도체화 시약으로 DNPH 1 g을 1000 mL methanol에 녹여 1000 mg/mL를 만들어 사용하였고, citric acid 1 M과 sodium citrate 1 M을 8:2(v/v)로 혼합하여 pH 3의 완충용액을 제조하여 사용하였다. Waters사(Massachusetts, USA)의 고체상 카트리지 플러스 C_{18} 과 Sartorius사(Chicago, IL, USA)의 Minisart RC 4(4.5 μm) 필터를 구입하여 사용하였다.

2.1.2. 기기 및 장치

본 연구에서 사용한 LC/DAD는 Agilent사(Santa Clara, CA, USA)의 1100 series 사용하였고, vacuum manifold는 SUPELCO사(Bellefonte, PA, USA)의 Visiprep™ 모델을 사용하였다. 펌프는 GAST사(Michigan, USA)의 제품을 사용하였다.

2.2. 시료 채취

2.2.1. 채취 시기 및 정수장

1998년부터 2007년까지 전국의 주요 정수장 중 4대

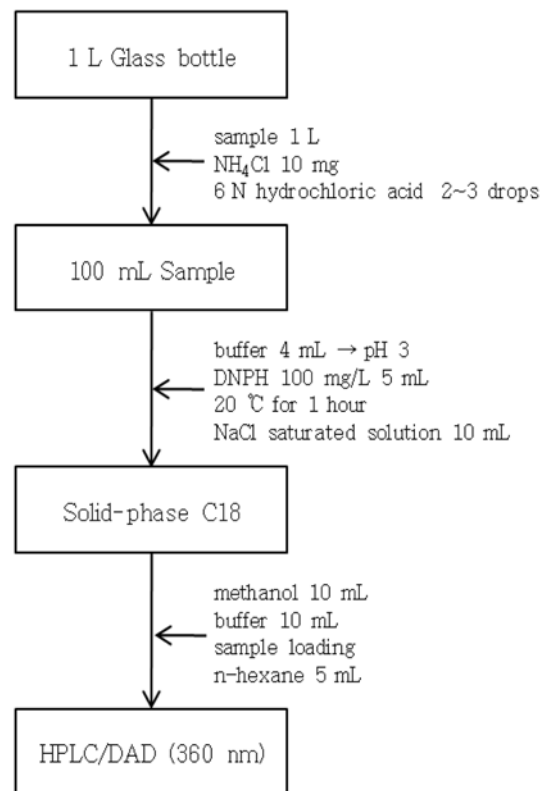


Fig. 1. Pretreatment of formaldehyde in water sample.

강 중심으로 34 개 정수장을 지정하여 매년 계절별로 평균 4 회 정수된 물을 채취하였다. 4대 강으로는 한강(서울, 경기, 충북, 강원도), 금강(대전, 충남), 낙동강(부산, 대구, 경북, 경남), 영산강(전북, 전남)으로 분류하였다.

2.3. 실험 방법

2.3.1. 시료전처리

시료의 전처리과정은 Fig. 1과 같이, 물 시료 100 mL를 250 mL 삼각플라스크에 취한 후 2,4-DNPH 5 mL와 완충용액 4 mL를 넣고 20 °C에서 1시간동안 반응시켰다. 반응시킨 시료에 염석효과를 위하여 sodium chloride 포화용액 10 mL를 넣었다. 고체상을 활성화하기 위해 메탄올 10 mL를 흘려준 다음, 정제수 100 mL에 buffer 4 mL를 넣어 희석시킨 용액 10 mL를 흘렸다. 다음으로 반응시킨 시료를 고체상에 통과시킨 후 고체상을 건조시켰다. Hexane 5 mL로 용출시켜 필터한 후 autosampler 용 바이알에 옮겨 담았다.

Table 1. HPLC operating conditions for formaldehyde

• Column : ODS Hypersil 100 × 4.6 mm, 5 μm
• Mobile Phase : CH ₃ CN/H ₂ O = 40/60(v/v) (isocratic elution)
• Wavelength : 360 nm
• Flow Rate: 1 mL/min
• Injection Volume : 10 μL
• Column Temperature : 40 °C
• Run Time : 15 min

2.3.2. 기기 분석

시료전처리가 끝난 용액을 Table 1에 나타낸 것처럼 물과 acetonitrile (60:40)을 이동상으로 하여 DAD 검출기(360 nm)를 사용하여 폼알데히드 유도체를 분석하였다.

2.3.3. 검정곡선 작성 및 검출한계 조사

공시료 100 mL에 표준용액을 단계적으로 첨가하여 5 μg/L, 10 μg/L, 20 μg/L, 50 μg/L, 100 μg/L, 200 μg/L으로 만든 후 전처리 방법과 같이 처리하고, HPLC로 분석하여 성분의 농도와 액체크로마토그램의 피크 면적과의 관계식을 구하였고, S/N ratio 3 이상 되는 최저농도를 검출한계로 정하였다.

2.3.4. 실제 시료의 분석

1998년부터 2007년까지 10년간 전국의 주요 정수장 중 4대 강(한강, 금강, 낙동강, 영산강)을 중심으로 34 개 정수장에서 채취한 정수시료 1,291 개를 대상으로 폼알데히드를 조사하였다.

위 전처리에서 얻은 용액 중 10 μL를 액체크로마토그래프에 주입하여 분석을 실시하고 검정곡선으로부터 시험용액 중의 각 성분의 양을 구하여 검수 중의 농도를 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 표준 물질 분석

HPLC를 사용하여 분리하고 UV 검출기로 검출하는데 있어서 감도를 높이기 위해서는 몰흡광계수가 충분히 커야하므로 몰흡광계수를 높이기 위한 유도체화 과정이 필요하다. US. EPA method 554에서 제시된 분석방법은 2,4-DNPH를 사용하여 폼알데히드를 유도체화한 후 C₁₈ 고체상으로 추출하고 HPLC로 분석하는 방법으로서 추출용매로 ethanol을 사용하고 있다. 그러나 본 연구에서는 추출용매로 n-hexane을 사용함으로써 ethanol로 추출할 경우 함께 추출되는 반응시약

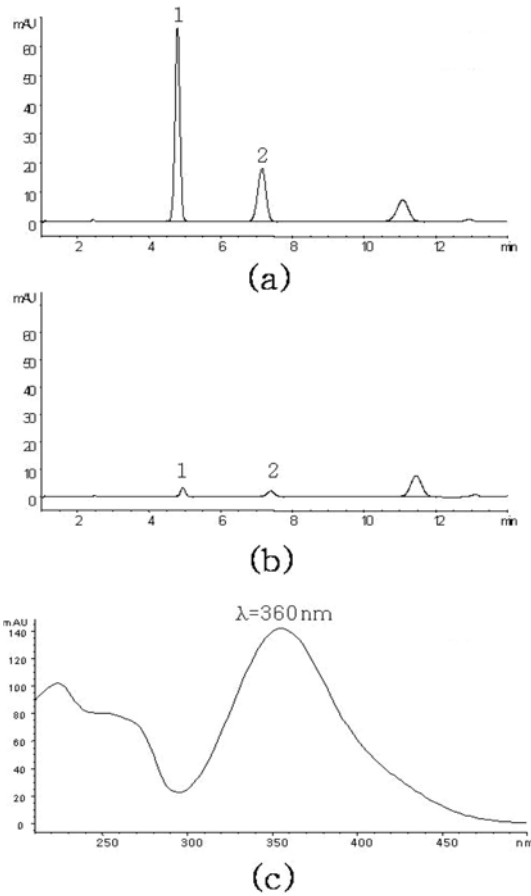


Fig. 2. HPLC chromatograms of the formaldehyde derivative extract in spiked water (a), in blank water (b), and UV spectrum of formaldehyde derivative (c). (1: formaldehyde 2: acetaldehyde)

잔류물을 가급적 제거하여 크로마토그램의 바탕선을 안정화시킴으로써 검출한계를 향상시키고자 하였다.

공시료에 첨가한 폼알데히드 표준품 및 blank water의 크로마토그램과 UV 흡수 스펙트럼을 Fig. 2에 나타내었다.

3.2. 검정곡선 및 회수율

폼알데히드의 검정곡선은 외부표준물질 분석법을 사용하였으며, 작성 결과 5-200 μg/L 농도범위에서 직선성이 0.999 이상으로 우수하게 나타났다. 본 실험의 검출한계는 3.0 μg/L, 정량한계는 10.0 μg/L로 이에 대한 결과는 아래 Table 2에 나타내었다.

폼알데히드의 회수율 측정을 위해 표준시료용액을 물 100 mL에 20 μg/L와 200 μg/L 되게 첨가한 후 시

Table 2. Standard calibration data and limits of detection

Concentration range (µg/L)	y = ax + b			MDL (µg/L)	PQL (µg/L)
	a	b	r ²		
5.0 - 200.0	4.5311	24.659	0.9994	3.0	10.0

MDL : Method of Detection Limit (S/N>3)
 PQL : Practical Quantitation Limit (S/N>5)

Table 3. Extraction recovery of formaldehyde (n=5)

Compound	20 µg/L		200 µg/L	
	Recovery (%)	RSD (%)	Recovery (%)	RSD (%)
Formaldehyde	85.4	6.1	86.5	5.1

료의 시험방법과 동일하게 처리하여 측정 한 결과, 85.4%와 86.5%의 추출 회수율을 보였으며, 상대표준 편차(RSD)는 각각 6.1%와 5.1%로 나타났다. 이에 대한 결과는 아래 Table 3에 나타내었다.

3.3. 실제 시료 분석

폼알데히드의 국내 정수장에서의 수계별, 계절별 발생 분포를 조사하기 위하여 1998년부터 2007년까지 10년간 전국 34개 정수장에서 연평균 4회 채취하여 정수장 먹는 물 시료를 분석하였다. 정수 분석결과, 검출빈도는 48.8% (630/1291) 이었고, 검출농도 범위는 5.2~101.9 µg/L 이었다.

연도별 분석결과, 기하평균 12.3~20.0 µg/L로 비슷한 농도로 검출되었으나, 검출빈도를 비교하여 보면 1998년의 검출빈도는 8.9% (12/135)로 낮았으나, 그 후 검출빈도가 높아지면서 2000년과 2001년의 검출빈도가 71.3% (97/136), 74.3% (101/136)로 높게 검출되었다(Fig. 3).

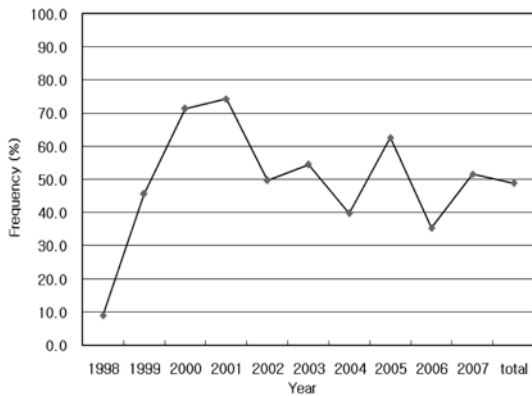


Fig. 3. Frequency of formaldehyde in 1998~2007.

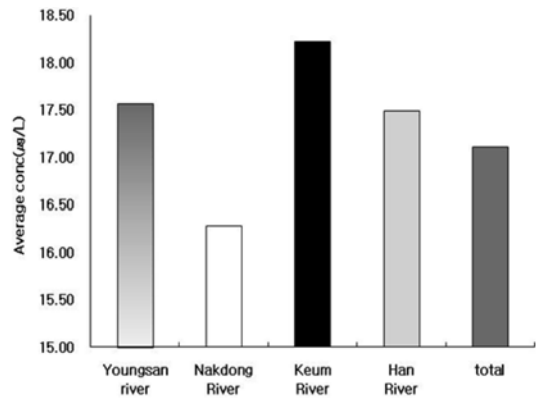


Fig. 4. Average concentrations of formaldehyde (1998~2007) from four Korean rivers.

수계별 분석결과, 검출빈도는 한강 수계에서 가장 높은 것으로 나타났으며, 대부분 고도정수처리를 통해 오존 소독을 시행하고 있는 낙동강 수계가 두 번째로 높았으나, 평균검출농도는 오히려 16.2 µg/L로 가장 낮게 측정되었다. 수계별 검출빈도를 살펴보면 한강>낙동강>금강>영산강 순으로 측정되었으며, 평균검출농도는 금강>영산강>한강>낙동강 수계 순으로 나타났다(Fig. 4).

또한 분석대상 정수장 34개 중 12개 정수장에서는 정수 뿐 아니라 원수를 같이 채취하여 분석하였다. 원수 분석결과, 검출빈도는 9.3% (38/360) 이었고, 검출농도 범위는 6.7~59.8 µg/L 이었다. 원수에서 폼알데히드 검출빈도, 검출농도 모두 정수와 비교하여 보았을 때 비교적 낮게 검출되고 있었으며, 한강 수계 중 암사와 구의, 낙동강 수계 중 덕산과 칠서, 영산강 수계 중 용연, 금강 수계 중 송촌 정수장과 각 취수장 분석결과를 비교해 보면 원정수가 비교적 비슷한 농

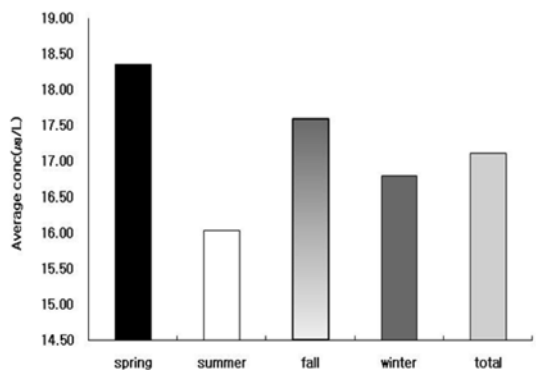


Fig. 5. Average concentrations of formaldehyde (1998~2007) of each season.

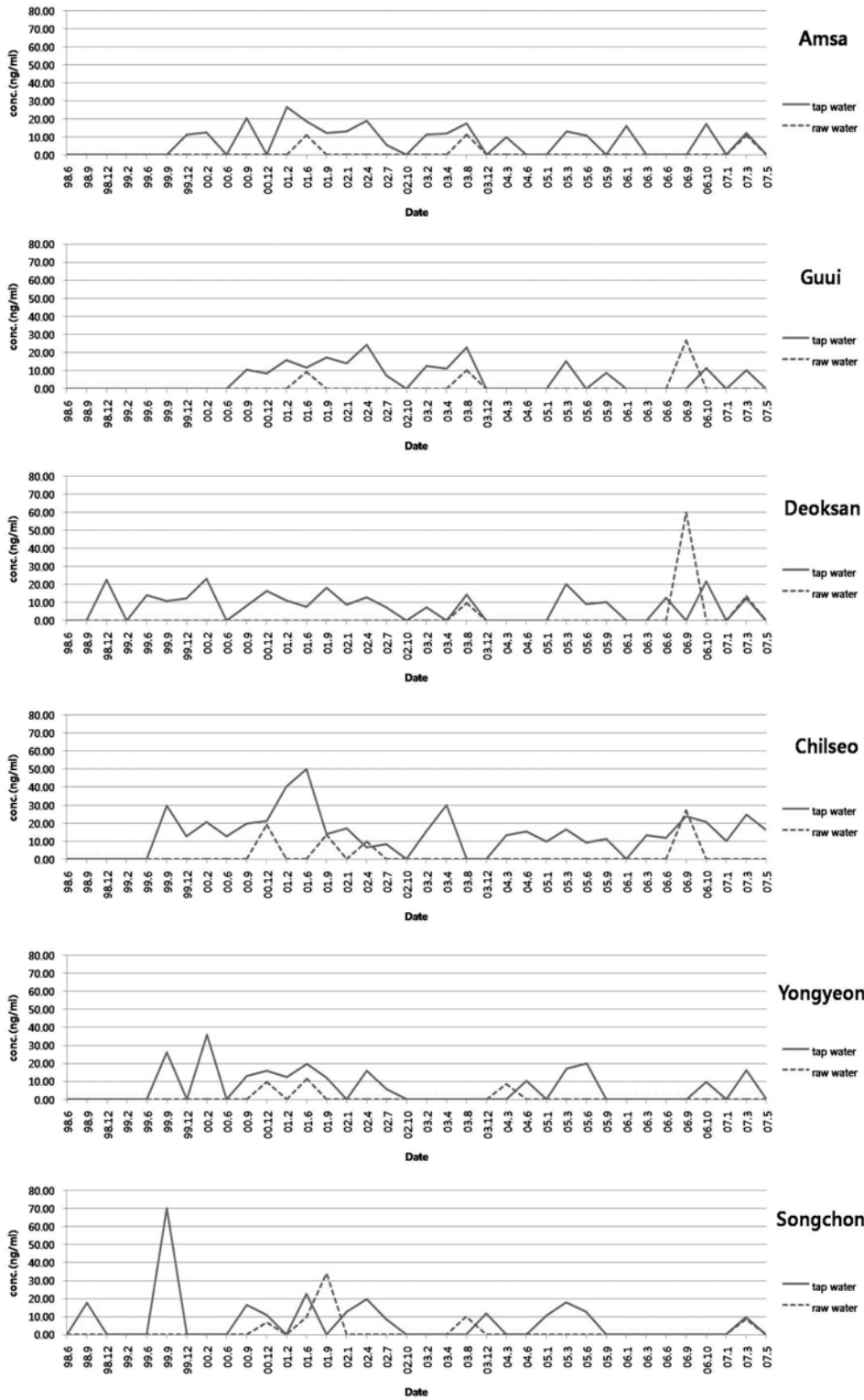


Fig. 6. Comparison of formaldehyde concentration between tap water and raw water.

도로 검출되고 있음을 알 수 있다. 하지만 송촌의 2002년 9월 결과와 구의, 덕산, 칠서의 2006년 9월 결과와 같이 정수에서 검출되지 않거나 정수보다 원수에서 더 높은 농도로 검출되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 고도 정수처리가 폼알데히드 생성에 큰 영향을 주지 않는 것을 나타낸다(Fig. 6).

계절별 분석결과, 상대적으로 강수량이 적은 봄(평균농도 18.4 µg/L)과 가을(평균농도 17.6 µg/L)이 여름(평균농도 16.0 µg/L)과 겨울(평균농도 16.8 µg/L)보다 더 높은 농도로 나타났다(Fig. 5). 시료 채취 시 수온보다는 계절별 강수량이 검출농도에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

3.4. 위해도 평가

4대 강을 중심으로 전국의 34 개 정수장에서 1998년부터 2007년까지 총 1291 개 정수 시료 분석 결과를 사용하여 음용수 섭취에 따른 인체 위해도 평가를 수행하였다. 인체노출 평가를 수행하기 위해 만성 1일 노출량은 Monte-Carlo simulation에 의한 확률적 농도 분포값으로 계산하고, 폼알데히드의 참고값(RfD)과 비교하여 위험지수(hazard quotient)를 산정하였다(Fig. 7).

인체노출평가 계산에 사용한 국내 성인 평균 체중은 61 kg(한국표준과학연구원, 국민표준체위 조사보고서, 1997년)을, 1일 음용수 섭취량은 1.4 L/day(90

Table 4. Chronic daily intake (CDI; mg/kg/day) and hazard quotient of formaldehyde in drinking water according to rivers and seasons (95 percentile)

	Chronic daily intake (mg/kg/day)	Hazard Quotient
Youngsan River	7.37×10^{-4}	3.69×10^{-3}
Nakdong River	8.10×10^{-4}	4.05×10^{-3}
Keum River	9.24×10^{-4}	4.62×10^{-3}
Han River	8.74×10^{-4}	4.37×10^{-3}
spring	8.62×10^{-4}	4.31×10^{-3}
summer	8.30×10^{-4}	4.15×10^{-3}
fall	7.98×10^{-4}	3.99×10^{-3}
winter	7.90×10^{-4}	3.95×10^{-3}
Total	8.75×10^{-4}	4.37×10^{-3}

percentile 값이 2.0 L/day, U.S. EPA)을 사용하였으며, 이 값들의 정규 분포(normal distribution)를 사용하여 simulation을 수행하였다. 음용수를 통해 노출된 기간은 미국 EPA에서 정한 값을(거주지역의 경우 30년) 사용하였고, 기대시간은 비발암성 경우 노출기간과 같은 30년을 사용하였다. 이때 만성 1일 노출량(CDI; mg/kg/day)은 다음과 같은 식을 이용한 통계 프로그램을 사용하였다(crystal ball ver. 7.2.2). 또한 검출한계 이하로 나타난 시료에 대해서는 검출한계 농도의 1/2 값을 사용하여 오염도 자료에 포함하여

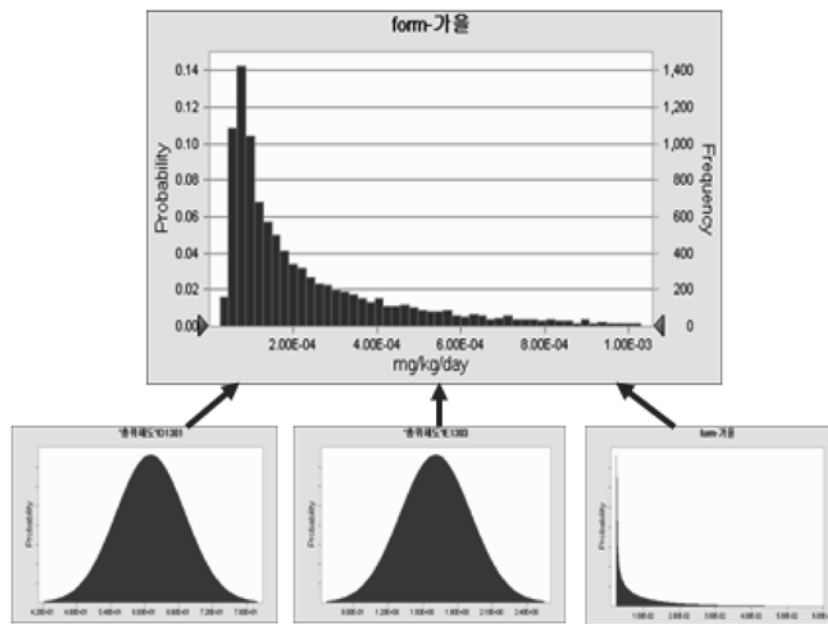


Fig. 7. Chronic daily intake (CDI; mg/kg/day) of formaldehyde by Monte-Carlo simulation.

계산하였다.

$$CDI = \frac{\text{오염도} \times \text{노출기간} \times 365 \text{일} \times 1 \text{일 음용수섭취량}}{\text{체중} \times \text{기대시간} \times 365 \text{일}}$$

CDI : mg/kg/day 오염도 : mg/L
 노출기간 : year 1일 음용수 섭취량 : L
 체중 : kg 기대시간 : year

폼알데히드는 먹는 물 음용시 비발암성으로 발암력(Q₁^{*})이 아닌 1일 참고값(RfD)을 적용하여 위험지수를 계산하였다. 미국 EPA를 비롯한 국제공인기구에서는 평가된 위험지수가 1보다 작으면 안전한 것으로 평가하고 있다. 수계별, 계절별, 전체에 해당하는 위해성 평가 결과, 모두 1 이하로서 안전한 것으로 판단하였다(Table 4).

4. 결 론

본 연구에서는 폼알데히드를 DNPH로 유도체화하여 추출과정을 거쳐 HPLC/DAD로 분석하였다. 시료 채취 시기는 1998년부터 2007년까지 전국 34 개 정수장에서 연평균 4 회 채취하여 분석하였다.

1998~2007년의 전체 시료에 대한 분석 결과, 각 연도별 농도는 비슷한 수준이었으나, 검출빈도를 보면 1999년 이후 높아진 것을 확인할 수 있었다. 산업적으로 폼알데히드 사용량이 늘어나고 발생률이 높아지면서 환경 노출이 증가한 것이라고 생각된다.

수계별 분석결과, 검출빈도가 높은 한강, 낙동강보다 금강, 영산강에서 검출농도가 높게 나타났다. 오존 처리를 하는 낙동강 수계에서 검출농도가 제일 낮았고 원수에서 폼알데히드가 검출되었으나 정수에서 검출되지 않거나 더 낮은 농도로 검출된 것으로 볼 때 폼알데히드는 고도 정수 처리 과정으로 인해 발생 또는 증가한다고 보기 어려우며, 다만 정수과정이 폼알데히드 발생의 한 가지 원인이 될 수는 있다고 사료된다.

계절별 분석결과, 검출빈도는 42~52%로 비슷하였지만, 갈수기인 봄, 가을이 여름, 겨울과 비교하였을 때 검출농도가 높게 나온 것을 확인할 수 있었다. 이 결과로부터 폼알데히드 검출 농도가 수온보다는 강수량에 더 영향을 받는 것으로 나타났다.

위해성 평가는 수도물의 먹는 물 음용시 폼알데히드의 비발암성을 고려하여 위험지수를 계산하였다. 수계별 위험지수는 금강 수계에서 4.62×10^{-3} 로 가장 높게 나타났고, 영산강 수계에서 3.69×10^{-3} 로 가

장 낮게 나타났다. 계절별 위험지수는 봄이 4.31×10^{-3} 로 가장 높게 나타났고, 가을이 3.95×10^{-3} 로 가장 낮게 나타났다. 하지만 95 percentile 값을 기준으로 한 위험지수는 모두 1 이하로서 안전한 것으로 판단하였다.

감사의 글

본 연구의 수행을 위해 시료 채취를 위해 도움을 주신 국립환경과학원, 환경부 및 각 정수사업소 관계자분들께 감사드립니다.

참고문헌

1. Susan, D. Richardson, *Journal of Environmental Monitoring*, **4**(1), 1-9(2002).
2. Rook, J. J., *Water Treat Exam.*, **23**, 234-235(1974).
3. C. Philip, Singer, Gregory, W. Harrington, Gretchen, A. Cowman, Marla, E. Smith, Daniel, S. Schechter and J. Lori, Harrington, 'Impacts of Ozonation on the Formation of Chlorination and Chloramination By-Products', American Water Works Association, Colorado, U.S.A., 1999.
4. '오존 및 이산화염소에 의한 소독부산물질 관리방안에 대한 연구', 6, 환경부, 2004.
5. W. H. Glaze, H. S. Weinberg, S. W. Krasner and M. J. Scilimenti, 'Trends in Aldehyde Formation and Removal Through Plants Using Ozonation Biological Active Filters', 913-943, American Water Works Association, Philadelphia, U.S.A., 1991.
6. C. Philip, Singer, 'Formation and Characterization of Disinfection By-Products', First International Conference on the Safety of Water Disinfection: Balancing Chemical and Microbial Risks., Washington, U.S.A., 1992.
7. 'Indoor Air Quality (IAQ)', U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Washington, U.S.A., 2007.
8. 'Guidelines for Drinking-Water Quality', World Health Organization (WHO), Geneva, 2005.
9. T. E. Graedel, 'Chemical Compounds in the Atmosphere', 161, Academic Press Inc, New York, U.S.A., 1978.
10. J. F. Kitchens, R. E. Casner, G. S. Edwards, W. E. Harward, B. J. Macri, 'Investigation of selected potential environmental contaminants: formaldehyde', EPA 560/

- 2-76-009, 22-80, Environmental Protection Agency, Washington, U.S.A., 1976.
11. K. Mopper and Stahovec, W. L. *Mar. Chem.*, **19**, 305-321, 1986.
 12. K. Verschueren, 'Handbook of Environmental Data on Organic Chemicals', 2nd ed, 678-679, Van Nostrand Reinhold, New York, U.S.A., 1983.
 13. 'Tech Info for Problem Spills: Formaldehyde', 2, Environment Canada, Quebec, Canada, 1985.
 14. G. Jack, Calvert, 'Formaldehyde and Other Aldehydes', National Research Council, Washington, U.S.A., 1981.
 15. '水質基準50項目', 東京都水道局, 東京, 日本, 2007.
 16. Standard Book of Methods, American Public Health Association(APHA)/American Water Works Association (AWWA)/Water Environment Federation (WEF), Washington, U.S.A., 1998.
 17. EPA Method 556, National Exposure Research Laboratory (NERL), U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Washington, U.S.A., 1998.
 18. Yasuaki Maeda, Xincheng Hu, Shigenao Itou, Masaru Kitano, Norimichi Takenaka, Hiroshi Bandow, and Makoto Munemori, *Analyst.*, **119**, 2237-2240(1994).
 19. Danuta Slawinska and Janusz Slawinski, *Anal. Chem.*, **53**(13), 2101-2109(1981).
 20. Tadao Sakai, Shin-ichi Tanaka, Norio Teshima, Seiji Yasuda and Nobuo Ura, *Talanta*, **58**, 1271-1278(2002).
 21. Robert, R., Mikach, Douglas, W. Anthon, Leah, Z. Fanning, Craig D. Hollowell, Kenneth Revzan and Jacqueline Glanville, *Anal. Chem.*, **53**(3), 2118-2123(1983).
 22. Paris, E. Georghiou and Leo Harlick, *Anal. Chem.*, **55**(3), 567-570(1983).
 23. Eugene R. Kennedy and Robert H. Hill, Jr., *Anal. Chem.*, **54**(11), 1739-1742(1982).
 24. William, H. Glaze, Minoru Koga and Devon Cancilla, *Environ. Sci. Technol.*, **23**(7), 838-847(1989).
 25. Y.-S. Park, Y.-J. Lee and K.-T. Lee, *J. Kor. Soc. Food Sci. Nutr.*, **35**(10), 1412-1419(2006).
 26. Merlin K. L. Bicking, W. Marcus Cooke, Fred K. Kawahara and James E. Longbottom, *Journal of Chromatography*, **455**, 310-315(1988).
 27. Y.-N. Lee and Xianliang Zhou, *Environ. Sci. Technol.*, **27**(4), 749-756(1993).
 28. Jianrong Li, Junli Zhu and Lifang Ye, *Asia Pac. J. Clin. Nutr.*, **16**(Suppl 1), 127-130(2007).
 29. Ikue Ogawa and James S. Fritz, *Journal of Chromatography*, **329**, 81-89(1985).
 30. Katsushige Takawii, Kazuhiro Kuwata, Akiyoshi Sugimae and Masao Nakamoto, *Anal. Chem.*, **57**(1), 243-245(1985).
 31. Rebecca A. Trenholm, Fernando L. Rosario-Ortiz and Shane A. Snyder, *Journal of Chromatography A*, **1210**, 25-29(2008).
 32. Qing Wang, John O'Reilly and Janusz Pawliszyn, *Journal of Chromatography A*, **1071**, 147-154(2005).
 33. S.-W. Tsai and C.-M. Chang, *Journal of Chromatography A*, **1015**, 143-150(2003).