

갱생 옥내급수관 수돗물에서 비스페놀-A 분포 및 위해성 평가 Distribution and Risk Assessment of Bisphenol-A in Tap Water from Rehabilitated Indoor Water Service Pipe

정관조[†] · 손보영 · 이인자 · 안치화 · 김준일 · 문보람 · 이수원 · 안재찬 · 김복순 · 정득모
Gwanjo Jeong[†] · Boyoung Son · Inja Lee · Chihwa Ahn · Junil Kim · Boram Moon ·
Suwon Lee · Jaechan Ahn · Bogssoon Kim · Deukmo Chung

서울특별시 서울물연구원

Seoul Water Institute, Seoul Metropolitan Government

(Received April 28, 2016; Revised May 16, 2016; Accepted July 8, 2016)

Abstract : In this study, the survey of bisphenol-A in indoor water service pipes rehabilitated with epoxy resin was conducted and the risk assessment was done to investigate the effect on the human health to drink tap water. Bisphenol-A in raw water was detected in a range of 50~118 ng/L in all samples, where the limit of quantification was 10 ng/L. This is caused by inflow of the sewage effluent or the tributaries of the surrounding area containing bisphenol-A. Bisphenol-A was not detected in finished water after the advanced water treatment process. It was achieved by its removal from the processes of flocculation-precipitation and oxidation of ozone and chlorine and by being changed to other by-product materials. For the indoor water service pipe, bisphenol-A was not detected in all cases which was not coated with epoxy resin. However, when epoxy resin is lined within the indoor water service pipe, bisphenol-A was identified at maximum level of 521 ng/L and was detected above the limit of quantitation at 68 percentages of all samples. The Hazard Quotient (HQ) at the maximum level (521 ng/L) of the detected bisphenol-A is 0.004, which is less than the reference value of 0.1 for the tap water intake. Therefore, it is considered that the detected levels of bisphenol-A in this study would be safe to drink tap water.

Key Words : Bisphenol-A, Risk Assessment, Indoor Water Service Pipe, Hazard Quotient

요약 : 본 연구에서는 에폭시 수지 갱생 옥내급수관 수돗물에 대해 비스페놀-A 실태조사를 실시하였고, 비스페놀-A가 수돗물 음용에 있어 인체에 미치는 영향을 파악하기 위해 위해성 평가를 실시하였다. 원수 중 비스페놀-A는 50~118 ng/L로 채취된 모든 시료에서 정량한계 10 ng/L 이상으로 검출되었다. 이것은 주변지역의 하수 방류수나 지천에 의한 비스페놀-A 유입에 의한 것으로 판단된다. 정수에서의 비스페놀-A는 불검출되었으며, 고도정수처리 공정에서 모두 제거된 것으로 추정되었다. 응집-침전과정과 오존 및 염소에 의해 산화되어 제거되거나 다른 산화 부산물질로 변화한 것으로 판단된다. 옥내급수관 수돗물의 경우, 에폭시 갱생공사를 실시하지 않은 수돗물 모두에서 비스페놀-A는 검출되지 않았다. 그러나 에폭시 갱생공사를 실시한 옥내급수관 수돗물에서 비스페놀-A가 불검출에서 최대 521 ng/L로 범위로 검출되었으며, 채취된 시료의 68%가 정량한계 이상으로 검출되었다. 검출된 비스페놀-A의 최대값(521 ng/L)에 대한 위해도 지수 산정 결과, 위해도 지수(HQ)는 약 0.004로 수돗물 섭취에 의한 위해판단 기준값 0.1 이하로 나타나 음용에 안전한 것을 확인하였다.

주제어 : 비스페놀-A, 위해성 평가, 옥내급수관, 위해도 지수

1. 서론

비스페놀-A (Bisphenol-A, BPA)는 2,2'-bis(4-hydroxyphenyl)propane, 4,4'-(propane-2,2-diy)l)diphenol과 같이 2개의 페놀 구조(C₁₅H₁₆O₂)를 가진 유기화합물이다.^{1,2)} 비스페놀-A는 1891년 디아닌(Dianin) 의해 처음으로 보고되었고, 1905년 Zincke에 의해 페놀과 아세톤으로 합성되었다.²⁾ 비스페놀-A 생산량의 약 95%는 에폭시 수지와 폴리카보네이트 플라스틱 제조의 단량체로서 사용되며 에폭시 수지와 폴리카보네이트에 대한 세계적인 수요의 꾸준한 증가로 2015년에는 약 5백만 톤으로 성장했다.^{3,4)} 에폭시 수지는 주로 금속과 직접 접촉하는 식품과 음료를 보호하기 위해 식품, 음료 캔의 내부 코팅제 및 수도관 부식방지용 내부 코팅제로 사용되고 있으며, 폴리카보네이트 플라스틱은 투명 플라스틱으로 식

품과 음료 포장재나 아기젓병, 렌즈 등 일상생활용품 제조에 널리 사용되고 있다.^{2,4)} 이러한 비스페놀-A의 제품에서의 다양한 용도 때문에 지표수, 지하수 등 수생 환경에 노출되기 쉽고 많은 연구결과들이 이 화학물질이 잠재적 내분비계 교란물질임을 보여주고 있기 때문에 비스페놀-A에 대한 인간과 환경 노출이 우려되고 있다.^{1,4)} 비록 비스페놀-A의 인간에 미치는 영향에 대한 정보는 부족하나 동물 실험을 통한 연구결과에 의하면 난소질환, 유산, 에스트로겐 활성 등 인간에 잠재적으로 심각한 영향을 미칠 것으로 예상된다.⁵⁾ 이러한 비스페놀-A에 대한 안전성을 위해 US EPA⁵⁾는 비스페놀-A를 내분비계 교란물질(endocrine disrupting compound, EDC)로 분류하였으며, 캐나다 정부(2008)는 비스페놀-A를 포함하는 폴리카보네이트 젓병의 수입, 판매 및 광고를 금지했다.⁵⁾ 유럽식품안전청(EFSA)은 2015년 1월

[†] Corresponding author E-mail: jgj730@seoul.go.kr Tel: 02-3146-1761 Fax: 02-3146-1759

일일노출허용량(tolerable daily intake, TDI)을 0.05 mg/kg of bw/day에서 0.004 mg/kg of bw/day로 크게 강화하였고,⁶⁾ 유럽연합(유럽화학국)은 담수에서의 수생생물 보호를 위해 비스페놀-A의 PNEC (predicted no effect concentration) 농도를 1.5 µg/L로 제한하였다.³⁾ 우리나라의 경우, 환경부는 1998년 6월부터 유해화학물질관리법에 의해 관찰 대상물질로 지정하였으며, 서울시는 2005년 7월부터 감시항목(0.1 mg/L 이하)으로 지정하여 관리하고 있다. 지표수나 지하수 등 수생 환경 중 비스페놀-A의 주요 오염원은 하·폐수처리장의 물리·화학적 및 생물학적 처리의 불완전한 제거와 분해로 인한 유입이며, 매립지 침출수, 제지 공장 폐수 유입, 폴리 카보네이트 플라스틱의 자연 분해 및 산업용 우물의 지하수 침출을 통한 유입 등이 있다.⁵⁾ 이에 많은 연구자들이 지표수, 지하수 및 정수처리공정에서의 비스페놀-A 실태조사 및 제거방법에 대한 다양한 연구를 실시하고 있다. Yamazaki 등⁴⁾은 한국, 중국, 일본, 인도의 지표수를 대상으로 비스페놀-A, 비스페놀-F 등 8종의 비스페놀 유사체(BPs)에 대한 실태조사를 실시하였으며, 우리나라 강에서의 비스페놀-A는 1.0~272 ng/L로 농도로 검출된다고 보고했다. Santhi 등³⁾은 말레이시아의 수도물(표준정수처리 공정)에서 비스페놀-A는 3.5~59.8 ng/L로 검출되었고 필터장치와 PVC 파이프에 연결된 수도꼭지에서는 평균 54.4 ± 6.57 ng/L로 연결이 없는 수도꼭지 농도 9.6 ± 4.25 ng/L보다 높게 검출되어 필터장치와 PVC 호스에 의한 비스페놀-A 오염의 가능성을 제기했다. Umar 등⁵⁾은 비스페놀-A 초기농도에 따른 오존 주입농도 및 처리시간에 차이는 있으나 오존에 의한 비스페놀-A 분해 효과는 70~100%라고 보고했으며, Yuksel 등⁷⁾은 폴리아미드 재질의 나노막과 역삼투막으로 비스페놀-A의 98% 이상이 제거 가능하다고 보고했다. 이와 같이 비스페놀-A의 실태조사와 제거방법에 대한 연구는 여러 연구자들에 의해 수행되었다. 그러나 예폭시 수지의 옥내급수관(옥내수도관) 부식방지용 내부 코팅제 사용으로 인한 수도물에서의 비스페놀-A의 실태조사나 위해성 평가는 전 세계적으로 연구한 사례가 없다. 서울시는 2007년 7월부터 서울시 수도조례로 주택 내 노후 옥내급수관에 대해 예폭시(비스페놀-A계) 갱생공사에 세대별 및 공용배관 공사비의 80%까지 지원하여 깨끗하고 안전한 수도물 공급에 노력하고 있으며, 경기도를 포함한 다른 지방자치단체도 공사비 지원에 차이는 있으나 옥내급수관 예폭시 갱생공사를 진행하고 있다. 따라서 주택 내 갱생 옥내급수관을 통한 수도물에서의 비스페놀-A에 대한 안전성의 확인이 필요하며 이를 위해서 갱생 옥내급수관 수도물에 대한 비스페놀-A 실태조사 및 안전성에 대한 연구가 요구된다.

이에 본 연구에서는 예폭시 갱생 옥내급수관 수도물을 대상으로 비스페놀-A 실태조사를 실시하였고, 위해성 평가(risk assessment)를 실시하여 수도물 중 비스페놀-A 농도가 인체에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고 안전한 수도물 공급과 관리를 위한 대안을 제시하고자 실시하였다.

2. 실험

2.1. 시약 및 재료

본 연구에 사용된 비스페놀-A 표준원액은 AccuStandard사 1,000 mg/L (in methanol, USA)을 사용하였으며, 대체표준물질은 ISOTEC (Ohio, USA)사 비스페놀-A-d₁₆ 분말 시약을 사용하였다. 고체상 추출을 위해 사용한 카트리지는 Waters (Oasis, Ireland)사의 HLB 6 cc (200 mg)를 사용하였고, 분석 시료의 탁질 제거를 위한 필터는 PTFE 47 mm, 0.45 µm 필터로 Millipore (Durapore, USA)사의 제품을 사용했다. 메탄올과 아세톤은 HPLC 등급으로 Merck (Lichrosolv, Germany)사 제품을 사용하였다. 분석물질과 금속이온의 반응을 억제하기 위해 사용하는 EDTA는 Fluka (Idranal, USA)사, ascorbic acid는 Sigma-Aldrich사를 사용하였다. 시료의 pH를 약 2로 조정하여 카트리지에 잘 흡착되게 하는 염산은 JKC (MS-10, 국산)사 class-8을 사용하였다.

2.2. 기기 및 장치

비스페놀-A의 분석을 위한 분석기기로는 액체크로마토그래프(liquid chromatograph, LC)는 1290 infinity series (Agilent-Technologies, USA)를 사용하였으며, binary pump와 1290 infinity series auto-sampler를 사용하였다. 질량분석장치(mass, MS)는 6490 triple quad (Agilent-Technologies, USA)를 사용하였고, 분석 컬럼은 Waters (XTerra, Ireland)사 MS C₁₈으로 길이 10 cm, 내경 2.1 mm, 입자크기 3.5 µm을 사용하였다. 비스페놀-A 추출을 위한 추출장치로는 자동고체상 추출장치인 Dionex Autotrace 280 (Thermo Scientific, USA)을 사용했고, 농축장치는 Biotage (Turbo Vap LV, USA)사 질소 증발농축기를 사용했다.

2.3. 시료 채취

비스페놀-A 실태조사를 위해 서울시 5개 취수장(팔당, 강북, 암사, 자양, 풍납) 원수 5점과 6개 아리수정수센터(광암, 강북, 암사, 구의, 뚝도, 영등포) 정수 6점을 채수하였다. 주택 내 노후 옥내급수관 예폭시(비스페놀-A계) 갱생공사에 따른 비스페놀-A 실태조사를 위해 2015년 5월~6월 사이에 예폭시 갱생공사를 실시한 A-아파트에서 2015년 11월~12월에 34점의 수도꼭지 수도물을 채수하였다. 또한 예폭시 갱생공사 전·후의 비스페놀-A 농도 변화를 비교하기 위해 A-아파트에서 갱생공사를 실시하지 않은 옥내급수관 수도꼭지 수도물 5점을 채수했다. 옥내급수관은 아파트, 빌라 등 주택 내 수도관으로 15 mm 아연도강관 재질이었다. 시료 채수병은 비스페놀-A 성분을 포함하지 않은 1,000 mL 갈색유리병 (PTFE 코팅된 격막을 장착한 마개)을 세척 후 탈이온수(Elga, UK)로 헹구고 자연 건조하여 사용하였고, 채수 전 아스코르브산 80 mg을 첨가했다.

2.4. 실험방법

2.4.1. 표준물질의 제조

시판되는 비스페놀-A 표준원액 1,000 mg/L을 메탄올에 희석하여 0.1 mg/L을 제조 후 단계별로 메탄올로 희석하여 10 ng/L, 20 ng/L, 50 ng/L, 100 ng/L, 200 ng/L, 500 ng/L, 700 ng/L 표준용액을 제조하여 사용하였다. 대체표준물질로는 비스페놀-A-d₁₆을 메탄올에 1,000 mg/L로 제조 후 1 mg/L로 희석하여 사용하였고, 표준용액과 대체표준물질은 기기분석 전까지 -20℃의 냉압소에 보관하였다.

2.4.2. 시료의 전처리

시료 1000 mL를 0.45 μm PTFE 필터로 여과하여 여액 500 mL를 갈색 유리병에 분취했다. 5% EDTA 1 mL를 첨가하여 분석물질과 금속이온의 반응을 억제하고, 염산(1+1)을 사용하여 시료의 pH를 약 2로 조정함으로써 카트리지에 잘 흡착될 수 있도록 한다. 전처리과정에서 손실되는 양을 보정하기 위하여 대체표준물질인 비스페놀-A-d₁₆ 1 mg/L을 표준물질과 분석 시료에 50 μL씩 첨가한 후, HLB 카트리지를 자동고체상추출장치에 장착하고 고체상 추출했다. HLB 카트리지에 메탄올, 1 N HCl, 정제수 순으로 각각 3 mL를 흘려 카트리지를 활성화한 후, 500 mL 시료를 10 mL/min 속도로 카트리지를 통과시켜 분석물질을 흡착시킨다. 간섭물질을 제거하고자 정제수로 세척하고 카트리지 내의 수분을 건조하기 위하여 40분간 질소 기체로 건조했다. 메탄올 3 mL로 3회 용리하여 카트리지내의 분석물질을 추출하고, 추출액을 증발농축기를 사용하여 5 psi, 25℃에서 90분간 질소로 모두 증발시킨 후 기기분석 전까지 -20℃에서 보관했다. 기기분석 전 정제수와 메탄올 50:50 용액 0.5 mL로 재용리하여 4℃에서 보관하며 LC-MS/MS를 이용하여 분석하였다.

2.4.3. LC-MS/MS 분석방법

컬럼을 통과시킨 시료를 ESI방법으로 이온화하고 질량분석기를 사용하여 스펙트럼과 크로마토그램을 얻었다. Table 1에 LC-MS/MS 기기조건을 나타냈고, Table 2에 LC-MS/MS를 이용한 비스페놀-A 분석 특성을 나타냈다.

2.5. 위해성 평가

2.5.1. 자료수집 및 평가

비스페놀-A은 에스트로젠 수용체와 결합하여 자연 내분비 기능을 변형시키는 에스트로젠과 유사한 화학물질로 유방암, 자궁 내막증, 불임 등 인간과 야생동물의 건강에 유해영향을 초래한다.¹⁾ 현재 발암에 대해 보고된 사례는 없으나 그 영향을 배제할 수 없으며 동물 실험결과, 신장, 간, 유방 동맥에 유해영향을 미치는 것으로 보고되고 있다.^{1,6)} 또한 옥탄올/물 분배계수(K_{ow})가 3~4로 자연수 중에 존재하며 생체에 농축되는 것으로 알려져 있다.⁸⁻¹⁰⁾ 이러한 생물농축은 먹이사슬을 통한 생물축적의 주요한 노출경로가 될 수 있다.

Table 1. LC-MS/MS operating parameters for bisphenol-A

Conditions						
Model	1290 infinity series (Agilent-Technologies)					
Injection vol.	10 μL					
Column	XTerra MS C18, 2.1×100 mm, 3.5 μm					
Column temp.	30℃					
Mobile phase	A : H ₂ O, B : CH ₃ OH					
Flow rate	0.3 mL/min					
Gradient	Time (min)	0	7	9	10	12
	B (%)	50	100	100	50	50
Model	6490 triple quadrupole (Agilent-Technologies)					
Analytical mode	ESI negative					
Gas temp.	150℃					
Gas flow	16 L/min					
Nevelizer	50 psi					
Sheath gas temp.	300℃					
Sheath gas flow	11 L/min					
Capillary	3500 V					
Nozzle voltage	2000 V					

Table 2. Analytical characteristics of methods for the determination of bisphenol-A by LC-MS/MS

Method detection limit (ngL ⁻¹) ^{a)}	3.2
Limit of quantitation (ngL ⁻¹)	10
Precision (RSD %) ^{b)}	5.1%
Recovery (%) ^{c)}	97% (20, 5.0)

^{a,b)} Calculated based on the peak area corresponding to 10 ngL⁻¹ (n=7).

^{c)} Percentage recovery expressed as the mean from three times independent analysis. Values in the bracket are the bisphenol-A concentration of the unspiked sample and that of bisphenol-A added in ngL⁻¹.

2.5.2. 노출평가

비스페놀-A의 발생 가능한 노출은 경구섭취와 피부 2가지로 구분되며 경구에 의한 섭취가 주된 경로이다. 90%가 식품에 의해 노출되며 10%는 물에 의한 노출이다.¹¹⁾ 특히 10%의 물의 노출 중 10% 미만이 피부 흡수이므로,¹¹⁾ 본 연구의 위해성 평가에는 마시는 물에 의한 비스페놀-A의 노출 시나리오만을 적용하여 실시하였다. 또한 광범위한 위해성 평가를 위해 수돗물을 직접 음용하였을 경우를 가정하여 위해성 평가를 진행하였다. 위에서 제시한 노출 시나리오에 따른 노출량 산출에 있어서는 다음과 같은 식 (1)을 적용하였다.

$$ING_{dw} = \frac{C_w \times WIR \times FI \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (1)$$

ING_{dw} = 섭취량(mg/kg·day)

C_w = 먹는물 속 화학물질의 농도(mg/L)

WIR = 하루 평균 물 섭취량(L/day)

FI = 오염원으로부터의 섭취율
EF = 연간 노출빈도(days/yr)
ED = 노출기간(yr)
BW = 노출기간동안의 평균체중(kg)
AT = 노출량이 평균되어지는 시간(day)

C_w는 먹는물 속 화학물질의 농도로 본 연구에서는 갯생 옥내급수관에서 용출된 비스페놀-A의 실태조사 결과값을 적용하였다. 세계보건기구(WHO)가 제시한 하루 물 섭취 권장량 2 L을 기준으로 하루 평균 물 섭취량(WIR)은 2 L로 하였으며, 오염원으로부터의 섭취율(FI)은 충분한 자료가 부족하므로 갯생 옥내급수관에서 용출된 비스페놀-A는 100% 사람에게 섭취 시 노출된다고 가정하여 1로 하였다. 연간 노출빈도(EF)와 노출기간(ED)은 본 연구기간 6개월과 같은 결과값이 1년간 지속적으로 노출되었을 경우로 가정하여 산정하였다. 노출기간동안의 평균 체중은 환경부 한국 노출계수 핸드북(2007)을 고려하여 남성 69.2 kg, 여성 56.4 kg의 평균값인 62.8 kg의 평균체중을 적용하였다. 노출량이 평균되어지는 시간(AT)은 비발암의 경우, 노출기간(ED) × 365일로 산정하였다.

2.5.3. 독성평가

비스페놀-A는 잠재적인 내분비계 교란물질로 알려져 있으나 발암성에 대한 동물 연구 및 임상연구에 대한 보고는 거의 없다. 일반적으로 비스페놀-A는 비발암성 물질로서 간주되어 위해도 산정 시 RfD (reference dose : 독성참고치)를 사용한다. 이는 식품 및 환경 매체 등을 통하여 화학물질이 인체에 유입되었을 경우, 유해한 영향이 나타나지 않는다고 판단되는 노출량을 의미한다. RfD 값은 비발암성 물질의 TDI (tolerance daily intake: 일일노출허용량), ADI (acceptable daily intake: 일일섭취허용량) 등의 값도 사용할 수 있다.¹²⁾ 비스페놀-A의 경우, 유럽식품안전청(EFSA)에서 TDI 값을 0.004 mg/kg·day로 제시하고 있어 이 값을 이용하여 위해도를 산정하였다.

2.5.4. 위해도 특성화

본 연구의 대상물질인 비스페놀-A의 위해도 평가는 비발암성 위해도 평가를 적용할 수 있다. 그러므로 대상물질의 최종적인 위해도 평가는 위해도 지수(Hazard Quotient : HQ)를 통하여 확인할 수 있다. 이를 산출하기 위한 식은 다음과 같다.

$$HQ = \frac{E}{RfD} \approx \frac{ING_{dw}}{TDI} \quad (2)$$

노출평가에서 추정된 섭취량과 유럽식품안전청이 제시한 TDI값의 비를 사용해 위해도 지수를 산정하였다. 일반적으로 위해도가 1 이상인 경우, 위해하다고 판정하나 본 연구의 위해도 평가과정에서는 물의 섭취에 의한 노출시나리오

만을 고려했으므로 식품에 의한 90%의 섭취율을 제외한 0.1을 위해판단 기준값으로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 원수에서의 비스페놀-A

5개 취수원수에서 검출된 비스페놀-A는 50~118 ng/L로 채취된(11월~12월 채수) 모든 시료에서 비스페놀-A가 정량한계 10 ng/L 이상으로 검출되었다. Santhi 등³⁾은 지역에 따라 차이는 있으나 말레이시아의 지표수에서 비스페놀-A가 불검출(<1.3 ng/L)~215 ng/L로 분석 시료의 93%에서 검출되었다고 보고했고, Yamazaki 등⁴⁾은 지표수에서 비스페놀-A는 일본(Edogawa, Arakawa, Tamagawa)은 3.1~120 ng/L, 중국(Pearl, West river)은 불검출~98 ng/L 검출되었고, 우리나라의 경우, 한강에서 4.6~272 ng/L, 낙동강에서 1.0~80 ng/L, 영산강에서 45~213 ng/L 농도로 검출된다고 보고하고 있다. 본 연구에서도 국내 주요 하천 및 외국 지표수에서의 비스페놀-A 농도와 유사한 농도를 나타냈다. 또한 Tan 등⁵⁾과 Umar 등¹³⁾의 연구에 의하면, 지표수와 지하수에서의 비스페놀-A 검출의 주요 오염원은 상류에 위치한 하·폐수처리장의 비스페놀-A의 불완전한 제거로 인한 유입과 주변지역에 위치한 주택 및 산업단지에서의 생활 하·폐수 유입에 의한 것이라고 하였다. 취수원수에서의 비스페놀-A의 발생도 한강·팔당상수원 주변의 하수처리장 방류수 유입과 다양한 유·무기물질을 함유한 수많은 지천 유입수에 의한 것으로 추정된다.

3.2. 정수에서의 비스페놀-A

6개 아리수정수센터 정수를 대상으로 비스페놀-A 실태조사 결과, 채취된 모든 시료에서 비스페놀-A가 정량한계 10 ng/L 미만으로 불검출 되었다. Kuch 등¹⁴⁾에 의하면 독일의 수도물에서의 비스페놀-A는 0.5~2.0 ng/L로 보고했고, Santhi 등³⁾은 표준정수처리과정 후 수도물 중 비스페놀-A는 3.5~59.8 ng/L로 조사되었다고 하였다. 또한 Stackelberg 등¹⁵⁾에 의하면 표준(기존)정수처리에서 비스페놀-A의 76%가 제거된다고 하였다. Umar 등⁵⁾은 비스페놀-A의 초기농도에 따른 오존처리 주입농도 및 처리시간에 차이는 있으나 지표수와 폐수에서의 오존에 의한 비스페놀-A 분해효과는 70~100%라고 하였으며, Lane 등¹⁶⁾은 유리잔류염소(HOCl/OCl) 1.0 mg/L에서 비스페놀-A의 반감기가 3~35분 (pH 6~11, 온도 10~25℃)이라고 보고했다.

서울시 아리수정수센터는 정수처리에 오존, 활성탄공정이 도입된 고도처리공정이 도입되어 운영되고 있으며, 원수에 존재하는 비스페놀-A가 혼화-응집-침전공정에 의한 제거와 오존 및 염소에 의한 산화과정을 거치면서 정수에서는 검출되지 않은 것으로 나타나 이것은 Umar 등의 연구결과와 일치하였다.

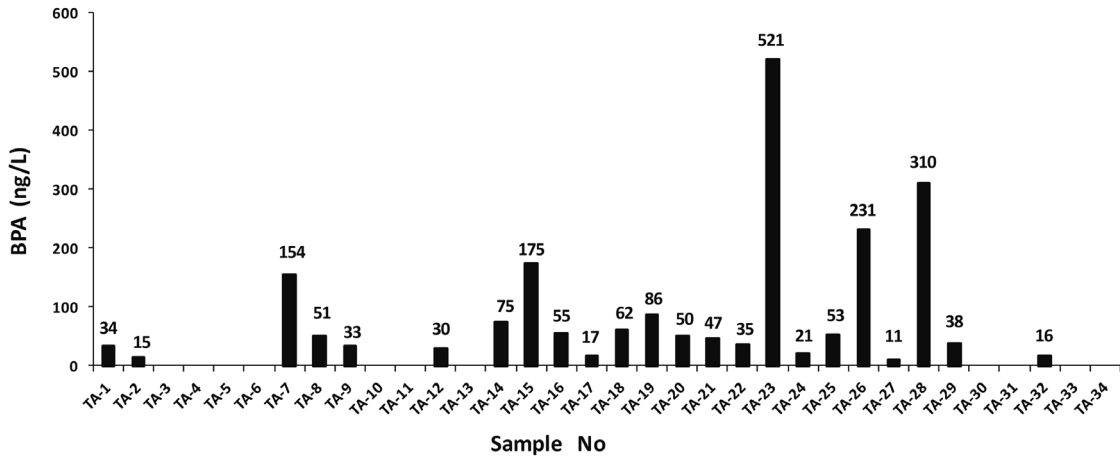


Fig. 1. Levels of BPA (ng/L) detected in tap water collected from 34 households of indoor water service pipes rehabilitated with epoxy resin 6 months ago. 「Total average (n=34) : 62 ng/L, Average (n=23) of BPA detected : 91 ng/L」.

3.3. 수도꼭지(옥내급수관)

옥내급수관 에폭시(비스페놀-A계) 갱생공사를 실시한 후 6개월이 지난 A-아파트에서 수돗물 34점을 채수하여 옥내급수관 에폭시 수지 내부코팅에 의한 비스페놀-A의 영향을 검토했다. 또한 에폭시 갱생공사 전·후의 비스페놀-A 농도 변화를 비교하기 위해 동일한 아파트에서 갱생공사를 실시하지 않은 옥내급수관 수돗물 5점을 채수하여 분석하였다.

갱생공사를 실시하지 않은 옥내급수관 모두에서 비스페놀-A는 검출되지 않았다. 그러나 에폭시 갱생공사를 실시한 옥내급수관에서 비스페놀-A는 불검출~521 ng/L(평균 62 ng/L, n=34)로 범위로 검출되었으며, 채취된 시료의 68%가 정량한계 이상으로 검출되었다. 갱생 옥내급수관에서의 비스페놀-A 농도를 Fig. 1에 나타냈다.

시료 채수는 분석결과와 해석을 위해 동일한 갱생업체(D-업체) 의해 시공되고 갱생 시기(2015년 5월~6월)가 유사한 A-아파트 한 곳을 대상으로 시료를 채수하여 분석하였다. 채취된 시료의 잔류염소 농도는 0.11~0.18 mg/L이었다. 그러나 Fig. 1에 나타난 바와 같이 갱생 옥내급수관에서 비스페놀-A 농도는 불검출에서 최대 521 ng/L으로 큰 차이를 나타냈다. 이것은 옥내급수관 갱생공사 시공의 차이보다는 가정의 수돗물 사용 빈도 차이에 의한 것으로 판단되며 TA-7, TA-15, TA-23, TA-26, TA-28의 비스페놀-A 농도가 154~521 ng/L로 높게 검출되는 것은 2인 가족 맞벌이 부부 가정으로 다른 가정에 비해 수돗물 사용이 작아 옥내급수관 정체수에 의한 것으로 추정된다.

비록 본 연구가 에폭시 수지 갱생 옥내급수관에 대한 비스페놀-A 실태조사를 최초로 실시한 연구이고, 평균 농도가 62 ng/L (n=34)로 비스페놀-A가 미량 검출되었지만 옥내급수관 갱생공사 기간에 따른 비스페놀-A 농도 변화, 잔류염소 농도에 따른 비스페놀-A 분해 등 물리·화학적 변화 영향뿐만 아니라 잠재적인 영향에 대한 다양한 연구가 필요하다.

3.4. 위해성 평가

갱생 옥내급수관 수돗물에서 검출된 비스페놀-A 농도를 Fig. 1에 나타냈다. 비스페놀-A는 불검출~521 ng/L로 검출되었으며 최대 검출 농도는 521 ng/L이었다. 본 연구에서는 옥내급수관 수돗물에서의 비스페놀-A의 최대값에 대해 위해도를 평가하고자 하며, 최대값에 대한 노출량 산정 공식 (1)에 적용하여 노출량을 평가했다.

$$\begin{aligned}
 ING_{dw} &= \frac{C_w \times WIR \times FI \times EF \times ED}{BW \times AT} \\
 &= \frac{0.000521 \text{ mg/kg} \times 2 \text{ L/day} \times 1 \times 365 \text{ days/yr} \times 1 \text{ yr}}{62.8 \text{ kg} \times 1 \text{ yr} \times 365 \text{ days}} \\
 &= 0.00001659 \text{ mg/kg} \cdot \text{day}
 \end{aligned}$$

검출된 비스페놀-A 최대값에 대한 노출량 산출량은 0.00001659 mg/kg·day이었으며, 유럽식품안전청(EFSA)에서 제시한 TDI값을 이용하여 위해도 지수(HQ)를 산정하면,

$$\begin{aligned}
 HQ &= \frac{E}{RfD} \approx \frac{ING_{dw}}{TDI} = \frac{0.00001659 \text{ mg/kg} \cdot \text{day}}{0.004 \text{ mg/kg} \cdot \text{day}} \\
 &= 0.00414809 \approx 0.004
 \end{aligned}$$

위해도 지수는 약 0.004로 수돗물 섭취에 의한 위해판단 기준값 0.1에 비해 거의 무시할 정도의 나타나 음용에는 안전한 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 에폭시 수지 갱생 옥내급수관 수돗물에 대해 비스페놀-A 실태조사를 실시하고, 비스페놀-A가 수돗물 음용에 있어 인체에 미치는 영향을 파악하기 위해 위해

성 평가를 실시하였다. 옥내급수관 수돗물의 경우, 에폭시 수지 갱생공사를 실시하지 않은 수돗물 모두에서 비스페놀-A는 검출되지 않았다. 그러나 에폭시 갱생공사를 실시한 옥내급수관 수돗물에서 비스페놀-A가 불검출에서 최대 521 ng/L로 검출되었으며, 채취된 시료의 68%가 정량한계 이상으로 나타났다. 검출된 비스페놀-A의 최대값(521 ng/L)에 대한 위해도 지수 산정 결과, 위해도 지수(HQ)는 약 0.004로 수돗물 섭취에 의한 위해판단 기준값 0.1에 비해 거의 무시할 정도로 나타나 음용에 안전하다는 것을 확인하였다.

본 연구결과, 갱생 옥내급수관에 대한 비스페놀-A의 오염수준이 위해하지 않은 것으로 나타났지만 옥내급수관을 장기간 사용 시 잠재적인 비스페놀-A의 오염도가 증가할 수 있고, 수돗물 내 잔류염소와의 반응으로 염소화-비스페놀-A 부산물 생성 등을 야기할 수 있으므로 지속적인 모니터링과 이에 따른 위해성 평가 연구가 필요하다.

Acknowledgement

본 연구는 환경부 “차세대 에코이노베이션사업(글로벌탑 환경기술개발사업)”의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다(GT-SWS-11-02-005-2).

KSEE

References

- Chen, M. Y., Ike, M. and Fujita, M., “Acute Toxicity, Mutagenicity, and Estrogenicity of Bisphenol-A and Other Bisphenols,” *Environ. Toxicol.*, **17**(1), 80~86(2002).
- Huang, Y. Q., Wong, C. K. C., Zheng, J. S., Bouwman, H., Barra, R., Wahlström, B., Neretin, L. and Wong, M. H., “Bisphenol A (BPA) in China: A review of sources, environmental levels, and potential human health impacts,” *Environ. Int.*, **42**, 91~99(2012).
- Santhi, V. A., Sakai, N., Ahmad, E. D. and Mustafa, A. M., “Occurrence of bisphenol A in surface water, drinking water and plasma from Malaysia with exposure assessment from consumption of drinking water,” *Sci. Total Environ.*, **427~428**, 332~338(2012).
- Yamazaki, E., Yamashita, N., Taniyasu, S., Lam, J., Lam, P. K. S., Moon, H. B., Jeong, Y. S., Kannan, P., Achyuthan, H., Munuswamy, N. and Kannan, K., “Bisphenol A and other bisphenol analogues including BPS and BPF in surface water samples from Japan, China, Korea and India,” *Ecotoxicol. Environ. Safety*, **122**, 565~572(2015).
- Umar, M., Roddick, F., Fan, L. and Aziz, H. A., “Application of ozone for the removal of bisphenol A from water and wastewater-A review,” *Chemosphere*, **90**, 2197~2207(2013).
- European Food Safety Authority (EFSA), scientific opinion on bisphenol-A, EFSA(2015).
- Yüksel, S., Kabay, N. and Yüksel, M., “Removal of bisphenol A (BPA) from water by various nanofiltration (NF) and reverse osmosis (RO) membranes,” *J. Hazard. Mater.*, **263**, 307~310(2013).
- Staples, C. A., Dom, P. B., Klecka, G. M., O’Block, S. T. and Harris, L. R., “A Review of the environment fate, effects, and exposures of bisphenol-A,” *Chemosphere*, **36**(10), 2149~2173(1998).
- Tisler, T., Krel, A., Gerzelj, U., Erjavec, B., Dolenc, M. S. and Pintar, A., “Hazard identification and risk characterization of bisphenols A, F and AF to aquatic organisms,” *Environ. Pollut.*, **212**, 472~479(2016).
- Guo, L., Li, Z., Gao, L. P., Hu, H. and Gibson, M., “Ecological risk assessment of bisphenol A in surface waters of China based on both traditional and reproductive endpoints,” *Chemosphere*, **139**, 133~137(2015).
- EFSA Panel on Food Contact Materials, Enzymes, Flavours and Processing Aids, “Scientific Opinion on the risks to public health related to the presence of bisphenol A (BPA) in foodstuffs: Executive summary,” *Europ. Food Safety Authority J.*, **13**(1), 1~23(2015).
- Rochester, J. R., “Bisphenol A and human health : A review of the literature,” *Reproduct. Toxicol.*, **42**, 132~155(2013).
- Tan, B. L. L., Hawker, D. W., Muller, J. F., Leusch, F. D. L., Tremblay, L. A. and Chapman, H. F., “Modelling of the fate of selected endocrine disruptors in a municipal wastewater treatment plant in South East Queensland, Australia,” *Chemosphere*, **69**, 644~654(2007).
- Kuch, H. M. and Ballschmiter, K., “Determination of Endocrine-Disrupting Phenolic Compounds and Estrogens in Surface and Drinking Water by HRGC-(NCI)-MS in the Picogram per Liter Range,” *Environ. Sci. Technol.*, **35**, 3201~3206(2001).
- Stackelberg, P. E., Gibs, J., Furlong, E. T., Meyer, M. T., Zaugg, S. D. and Lippincott, R. L., “Efficiency of conventional drinking-water-treatment processes in removal of pharmaceuticals and other organic compounds,” *Sci. Total Environ.*, **377**, 255~272(2007).
- Lane, R. F., Adams, C. D., Ahmad, E. D., Randtke, S. J. and Carter, Jr, R. E., “Chlorination and chloramination of bisphenol A, bisphenol F, and bisphenol A diglycidyl ether in drinking water,” *Water Res.*, **79**, 68~78(2015).