

ORIGINAL ARTICLE

수돗물을 통해 노출되는 녹조독소의 인체위해성 평가

이재현 · 신귀암*

아주대학교 환경안전공학과

Quantitative Risk Assessment of the Adverse Effects due to Exposure to Cyanobacteria Toxin (Microcystin-LR) through Drinking Water in the Nakdong River Watershed

Jae-Hyun Lee, Gwy-Am Shin *

Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University, Suwon 16499, Korea

Abstract

The primary purpose of this study was to determine the risk of various disease outcomes due to exposure to cyanobacteria toxin (microcystin-LR) through drinking water in a Korean watershed. In order to determine the risk in a more quantitative way, the risk assessment framework developed by the National Research Council (NRC) of the United States (US) - hazard identification, dose-response relationship, exposure assessment, and risk characterization - was used in this study. For dose-response relationships, a computer software (BenchMark Dose Software (BMDS)) developed by the US Environmental Protection Agency (EPA) was used to fit the data from previous studies showing the relationship between the concentration of microcystin-LR and various disease outcomes into various dose-response models. For exposure assessment, the concentrations of microcystin-LR in the source water and finished water in a Korean watershed obtained from a recent study conducted by the Ministry of Environment of Korea were used. Finally, the risk of various disease outcomes due to exposure to cyanobacteria toxin (microcystin-LR) through drinking water was characterized by Monte-Carlo simulation using Crystall Ball program (Oracle Inc.) for adults and children. The results of this study suggest that the risk of disease due to microcystin-LR toxin through drinking water is very low and it appears that current water treatment practice should be able to protect the public from the harmful effects of cyanobacteria toxin (microcystin-LR) through drinking water.

Key words : Cyanobacteria, Microcystin-LR, Drinking water, Quantitative risk assessment

1. 서론

최근 들어 우리나라 주요하천에서 녹조현상이 해마다 일어나고 있어 심각한 환경적, 사회적, 경제적 문

제를 야기하고 있다. 하지만 현재 국내에서 녹조에 대한 연구는 남조류 발생의 모니터링, 녹조 독소의 발생 특성, 그리고 녹조발생시 제어기술에 대한 연구 등이 주를 이루고 있으며, 정작 이러한 녹조 독소에 노출

Received 15 December, 2016; **Revised** 13 February, 2017;

Accepted 20 February, 2017

***Corresponding author:** Gwy-Am Shin, Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University, Suwon 16499, Korea

Phone : +82-31-219-2403

E-mail : gwyam@ajou.ac.kr

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© 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.

되었을 때 사람들의 건강에 미치는 인체위해성의 정도는 정량적으로 측정되어 있지 않은 실정이다. 사실 지금까지 알려진 이천여 종의 남조류 중 인체에 유해한 독소를 생성하는 것은 수십 종으로 알려져 있으며 (World Health Organization (WHO), 1999), 이들 남조류는 간이나 신경계 뿐 아니라 다른 여러 신체기관과 심지어는 간암 등을 일으키는 다양한 종류의 독소를 생성한다고 알려져 있다(WHO, 1999).

이 연구에서는 수돗물을 통하여 노출되는 녹조독소에 대한 인체 위해성 평가를 실시하였다. 현재 음용수를 통해 노출되는 인체 위해성에 대해서는 1999년 세계보건기구(WHO, 1999)가 제시한 가이드라인 (microcystin-LR 1 µg/L)이 중국, 프랑스, 이태리, 일본 등 세계 많은 나라에서 가이드라인으로 활용되고 있으며 우리나라도 이 가이드라인을 따르고 있다. 하지만 이 세계보건기구의 가이드라인은 동물실험을 통해 구한 반수 치사량(LD₅₀)을 기반으로 한 것이어서 사람들이 여러 환경에서 다양한 농도의 녹조독소에 노출되었을 때 나타날 수 있는 여러 종류의 위해성을 정량적으로 예측하기에는 적합하지 않은 것이 사실이다.

이 연구에서는 현재 우리나라에서 수돗물을 통해 노출되는 녹조독소의 다양한 인체위해성을 보다 정량적으로 평가하기 위해서 미국의 국립연구재단(National Research Council (NRC))에서 개발된 정량적인 위해성 평가를 사용하였다(NRC, 1983). 우선 녹조를 발생시키는 주요 남조류에서 생성하는 주요 독소의 위해성을 조사하고(hazard identification), 다음으로 이들 녹조독소의 수돗물의 원수와 최종처리수에서의 농도자료를 활용하여(exposure assessment), 그 노출 자료를 이들 녹조독소들의 독성실험 자료에 기반을 둔 최적의 용량-반응 모델(dose-response relationship)에 대입하여 최종적으로 다양한 녹조농도에 노출되었을 때 발생하는 여러 종류의 위해성을 정량적으로 결정하였다(risk characterization). 또한 이러한 위해성 평가를 성인들뿐만 아니라 어린이 등의 다양한 민감군에 대해서도 조사하여, 녹조의 대량 발생이 우리나라 국민들의 건강에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 녹조독소의 위해성

녹조현상은 오래전부터 전 세계적으로 문제가 되고 있는 현상으로, 최근 우리나라의 많은 수계에서도 발생하여 여러 가지 환경적, 사회적, 경제적 문제가 되고 있다. 녹조현상이란 물의 부영양화가 일어날 경우 물에 살고 있던 조류 중 주로 남조류의 숫자가 급격히 늘어나는 현상으로, 녹조 현상이 일어나면 먼저 미관상 좋지 않으며, 수계내의 다른 미생물들의 생장을 억제하여 생태계를 교란하고(Kearns and Hunter, 2001), 심할 경우 수중의 산소를 고갈시켜 수생생물의 질식사 가 일어나는 등의 생태적 문제를 일으킨다(Francis, 1878). 또한 정수처리면에 있어서는 정수시 여과장치의 기능을 저하시키고, 녹조류가 발생하는 물질로 인해 수돗물에서 이취미 문제를 야기하기도 한다. 특히 녹조현상과 관련해서는 남조류가 생산하는 독성물질들로 인한 피해가 가장 심각한데, 남조류가 대량으로 발생한 지역에서 가축과 야생동물 등이 녹조독소로 인해 죽은 사례들이 전 세계적으로 보고되고 있다 (Falconer et al., 1983; Carmichael et al., 1992). 사람에 대한 직접적인 피해에 대해서는 아직 자세히 알려져 있지 않지만, 1996년 브라질에서 50명의 환자가 녹조독소의 하나인 microcystin이 포함된 물을 투석에 이용하여 사망에 이르게 된 사례(Jochimsen et al., 1998)가 보고되어 있다.

2.1.1. 녹조 독소

남조류가 생산하는 독소의 종류로는 크게 간 독소인 microcystin(LR, RR, YR 등)과 nodularin, 신경 독소인 anatoxin-a와 saxitoxin, 그리고 세포 독소인 cylindrospermopsin 등이 있다. 하지만 불행히도 녹조독소의 독성에 대한 정량적 연구는 일부 microcystin 그 중에서도 microcystin-LR에 국한되어 있는 실정이다.

2.1.2. Microcystin-LR

Microcystin-LR은 주로 *Microcystis*, *Anabaena*, *Nostoc*, *Anabaenopsis* 등의 남조류에서 생산되는 독소로(Dow and Swoboda, 2000), ADDA (3-amino-9-methoxy-2,6,8-trimethyl-10-phenyldeca-4,6-dienoic

acid)라고 불리는 아미노산이 간독성물질(hepatotoxin)로 작용한다(Dawson, 1998). 인체에 노출되는 경로는 식수를 통해 마시거나(Ueno et al., 1996; WHO, 1998; Zhou et al., 2002), 물놀이(WHO, 2003), 혈액 투석(Pouria et al., 1998), 음식을 통한 섭취(Williams et al., 1997; Amorim and Vasconcelos, 1999; Codd et al., 1999; Schaeffer et al., 1999) 등이 있다. Microcystin-LR의 독성은 대부분 동물을 이용한 실험들에서 관찰된 증상들이며 사람에서의 독성 연구자료는 거의 없는 실정이다. 참고로 이번 연구에서의 노출경로와 비슷한 노출경로인 쥐에게 경구투여한 실험에서 얻은 microcystin-LR의 반수치사량(LD₅₀) 값은 5 mg/kg 이다(Fawell et al., 1999).

2.2. 용량-반응 평가

2.2.1. 용량-반응 평가에 사용된 동물실험 결과

앞에서 언급한 바와 같이 microcystin-LR에 대한 용량-반응 실험은 대부분 실험용 쥐를 대상으로 한 것이며, 그 중 Heinze et al.(1999)의 실험결과에서 간세포 손상을, Fawell et al.(1999)의 실험결과에서 만성 간 염증의 결과를 이용하여 용량-반응 평가를 실시하였다. 이들 증상들은 투여 용량의 증가와 발병률의 상

관관계가 다른 증상들에 비해 비교적 뚜렷하였으며, 간세포 손상과 만성 간 염증 증상은 microcystin-LR에 의한 각각 급성 독성과 만성 독성을 알 수 있는 좋은 지표라고 생각하여 선정하였다.

2.2.2. 용량-반응 평가

용량-반응 평가는 미국 환경청 (United States (US) Environmental Protection Agency (US EPA))이 개발한 컴퓨터 프로그램인 BenchMark Dose Software (BMDS)를 이용하였다. BMDS 프로그램은 용량-반응 평가의 실험 결과를 다양한 종류의 용량-반응 모델에 적합시켜 그 중에서 가장 적합한 모델을 선정하는데, 여러 가지 용량-반응 모델 중 가장 적합한 모델은 p값, AIC (Akaike Information Criterion), 등의 여러 통계학적 검정방법을 이용하여 선정하였다.

2.3. 노출 평가

2.3.1. 대상 지역

낙동강 수계는 오랫동안 경상남북도 지역의 많은 국민들의 식수원으로 사용되고 있으며 또한 최근 몇 년 동안 녹조의 대량발생이 여러 차례 보고되었기 때문에 이 수계에서 발생하는 수돗물을 통해 노출되는 녹조 독소에 의한 인체 위해성에 대한 평가가 필요한

Table 1. Microcystin-LR concentration in the raw water of 14 water purification plants in Nakdong River water system ($\mu\text{g/L}$)

Name of water purification plant	Inspection period			
	8.1-8.7	8.8-8.14	8.15-8.21	8.22-8.28
Gumi	0	0	0	0
Goryeong	0	0.1	0	0
Munsan	0	0	0	0
Maegok	0	0	0	0
Cangwon-Chilseo	0	0	0.5	0.6
Bansong	0	0.2	2.2	5.4
Seokdong	0	0	0.2	0.7
Samkae	0	0	0.1	0.3
Myeongdong	0	0	0.1	0.3
Duksan	0.2	0.4	0.6	2
Hwamyong	0.1	0.3	0.4	0.8
Unsang	0	0	0	0
Beomeo	0	0.3	0	0.1
Shindosi	0	0.3	0	0.1

지역으로 생각되어 대상 지역으로 설정하였다.

2.3.2. 정수장의 원수에서의 microcystin-LR 농도

본 연구에서 사용한 microcystin-LR의 농도는 원수를 낙동강으로부터 취수하는 낙동강 수계 내 14개소 정수장에서 2016년 8월 1일~8월 28일 측정된 원수와 최종처리수에서의 조류독소 농도를 이용하였다 (Korean Ministry of Environment, 2016). 원수의 microcystin-LR 농도는 0-5.4 µg/liter이었으며 최종처리수에서는 모든 곳에서 검출되지 않았다(Table 1).

2.3.3. 인체노출 시나리오

이 연구에서 사용한 노출 시나리오는 위에 언급한 낙동강 수계에서 취수한 원수가 정수장에서 정수처리 과정을 거친 후 가정에 공급되어 식수로 이용되었을 때였다. 정수장의 원수에서의 microcystin-LR의 농도는 환경부의 보도자료를 참조하였으며, 이 녹조독소가 낙동강 수계의 대부분의 정수장에서 운영하고 있는 고도정수처리시설을 통하여 단계적으로 제거된다고 가정하였다. 즉, 환경부의 보도자료를 바탕으로 정수단계를 착수정, 혼화/응집/침전, 여과, 오존처리, 입상활성탄 처리의 5단계로 나누고, 각각의 단계에서 microcystin-LR 농도가 10, 70, 75, 99, >99%가 제거된다고 가정하였다(Korean Ministry of Environment, 2016). 개인의 1일 평균 물 섭취량은 미국 환경청에서 수집한 자료에서 얻었다(성인 남녀의 경우에는 하루 2리터, 8세 남녀에 대해서는 하루 1 리터; US EPA, 2000). 또한, 성별, 연령에 따른 위해성의 차이를 알아보기 위해서 성인남녀와 8세의 남녀, 네 가지 경우에 대해 인체위해성평가를 실시하였다.

2.4. 인체위해성 결정

용량-반응 평가와 노출평가의 자료를 바탕으로 수돗물을 통해 노출되는 microcystin-LR로 인한 인체위해성을 정량적으로 평가하기 위해서 Monte-Carlo 시뮬레이션을 실시하였다. Monte-Carlo 시뮬레이션은 난수를 발생시켜서 함수의 값을 확률적으로 계산하는 알고리즘으로, 각 변수의 모델들로부터 매우 많은 횟수의 임의추출을 거쳐서 목표로 하는 결과 값의 확률 분포를 추정할 수 있다. 이 연구에서는 이전 환경부의 보도자료에서 보고된 낙동강 수계의 정수장 원수와

각 정수단계에서의 microcystin-LR의 농도를, 미국 환경청의 BMDS 프로그램을 통해 구한 가장 적합한 용량-반응 모델에 적용하여 수돗물을 통해 노출되는 microcystin-LR로 인한 인체위해성을 평가하였다. 어떤 독성물질의 사람에 대한 위해성을 평가할 때, 동물에게서 얻은 독성자료를 이용하여 사람에게 적용하는 것은 여러 가지 한계성에도 불구하고 현재 상황에서는 가장 유용한 방법으로 널리 통용되고 있으며 (NRC, 1983), 그러한 한계성(동물실험의 경우에는 실험동물의 특성을 균일하게 관리하는 것이 가능하지만 사람의 경우에는 그렇지 못하며, 일반적으로 동물실험에서는 동물들이 높은 농도의 독성에 노출시키지만 사람들은 환경내에서 상대적으로 낮은 농도에 노출된다 등)을 보완하기 위하여 일반적으로 동물실험에서 얻은 결과를 사람에게 적용할 경우에는 10이나 100의 안전계수를 사용하는 것이 일반적이다. Monte-Carlo 시뮬레이션을 시행하기 위한 프로그램으로는 Oracle사의 프로그램인 Crystall Ball이 사용하였다. Monte-Carlo 시뮬레이션에 최종적으로 적용된 식은 다음과 같다.

간세포 손상: $P = \Phi(\alpha + \beta \ln(d))$,

$$\Phi(x) = \int_{-\infty}^x \phi(t) dt, \quad \phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2},$$

여기서, $\alpha = -3.68466$, $\beta = 1$, $d = \frac{C \times R \times I}{W}$,

C: 원수에서의 microcystin-LR의 농도(µg/L),

R: 정수처리시설에서 제거 효율,

I: 개인의 1일 평균 물 섭취량(L),

W: 체중(kg)

간 염증: $P = \Phi(\alpha + \beta^*(d))$,

$$\Phi(x) = \int_{-\infty}^x \phi(t) dt, \quad \phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2},$$

3. 결 과

3.1. 용량-반응 평가

3.1.1. 간세포 손상 (급성 독성)의 용량-반응 평가
Table 2는 Heinze et al.(1999)의 용량-반응 실험

Table 2. Dose-response models to fit the data (degenerative and necrotic hepatocyte) from Hienze et al.(1999) by BMDS software

Model	Degrees of freedom	P-value	AIC
Gamma	2	0.9553	22.051
Logistic	1	0.0639	28.306
Loglogistic	1	1.0000	23.962
Logprobit	2	0.9945	21.973
Multistage	1	0.9964	23.962
Multistage Cancer	2	0.9553	22.051
Probit	1	0.0613	28.431
Weibull	2	0.9553	22.051
Quantal Linear	2	0.9553	22.051

결과 중 간세포 손상(급성 독성)의 결과를 미국 환경청의 BMDS 프로그램으로 분석한 결과이다. 표에 표시된 여러 가지 수학적 모델 중에서 p값이 가장 크고, AIC가 가장 작은 Logprobit 모델이 이 실험결과를 가장 잘 설명하는 가장 적합한 모델을 판명되었으며 그 결과는 Fig. 1과 같다.

3.1.2. 만성적 간 염증 (만성독성)에 대한 용량-반응 평가 모델

간에서 발생하는 많은 질환들은 장기적으로 간 염증을 동반할 수 있기 때문에 만성적 간 염증 증상은 간

독소인 microcystin-LR의 만성독성의 지표가 될 수 있다. Table 3은 Fawell et al.(1999)의 용량-반응 실험 결과 중 만성 간 염증 (만성 독성)을 미국 환경청의 BMDS 프로그램으로 분석한 결과이다. 여러 가지 수학적 모델 중에서 p값이 가장 크고 AIC가 가장 작은 Probit모델이 이 실험결과를 가장 잘 설명하는 가장 적합한 모델을 판명되었으며 그 결과는 Fig. 2와 같다.

3.2. 노출 평가

Fig. 3은 환경부 보도자료(Korean Ministry of Environment, 2016)에 보도된 낙동강 수계의 하천수

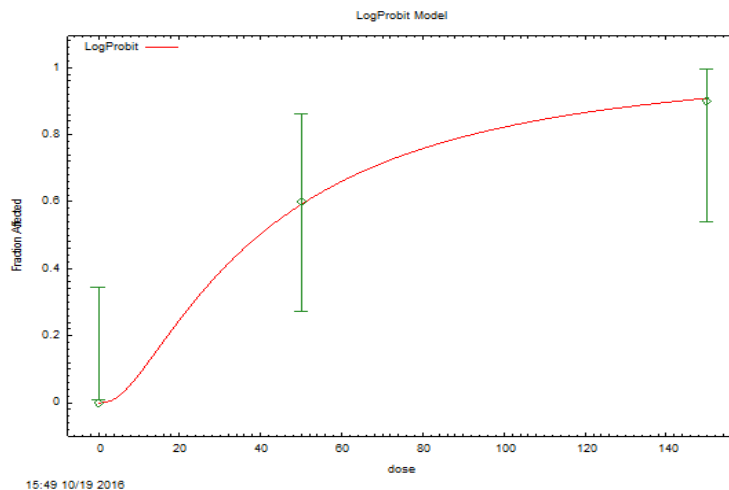
**Fig. 1.** Best-fit dose-response model (Logprobit) for the data of degenerative and necrotic hepatocyte from Hienze et al.(1999) by BMDS software.

Table 3. Dose-response models to fit the data (chronic inflammation) from Fawell et al.(1999) by BMDS software

Model	Degrees of freedom	P-value	AIC
Gamma	2	0.2770	124.04
Logistic	2	0.6231	122.29
Loglogistic	1	0.2488	124.70
Logprobit	1	0.2434	124.74
Multistage	1	0.3377	124.27
Multistage cancer	1	0.3377	124.27
Probit	2	0.6463	122.23
Weibull	2	0.2770	124.04
Quantal linear	2	0.2770	124.04

로부터 원수를 취수하는 14개 정수장의 원수에서의 microcystin-LR 농도의 확률 분포이다. 낙동강 수계의 14개 정수장의 원수에서 측정된 microcystin-LR의 농도와 가장 유사한 형태로 추정된 확률 분포는 로그 정규 분포로 판명되었으며, 그 평균은 1.1($\mu\text{g/liter}$), 표준편차 98.44이었다.

앞에서 언급된 바와 같이 원수에서의 microcystin-LR의 농도는 낙동강 수계의 대부분의 정수장에서 운영하고 있는 고도정수처리시설을 통하여 단계적으로 제거된다고 가정하였다(Korean Ministry of Environ-

ment, 2016). 즉, 환경부의 보도자료를 바탕으로 정수단계를 착수정수, 혼화/응집/침전, 여과, 오존처리, 입상활성탄 처리의 5단계로 나누고, 각각의 단계에서 microcystin-LR 농도가 10, 70, 75, 99, >99%가 제거된다고 가정하였다.

3.3. 위해성 평가 결과

3.3.1. 간세포 손상

3.3.1.1. 하루 동안 노출 시의 위해성

Figs. 4-7은 주어진 노출 시나리오대로 수돗물을

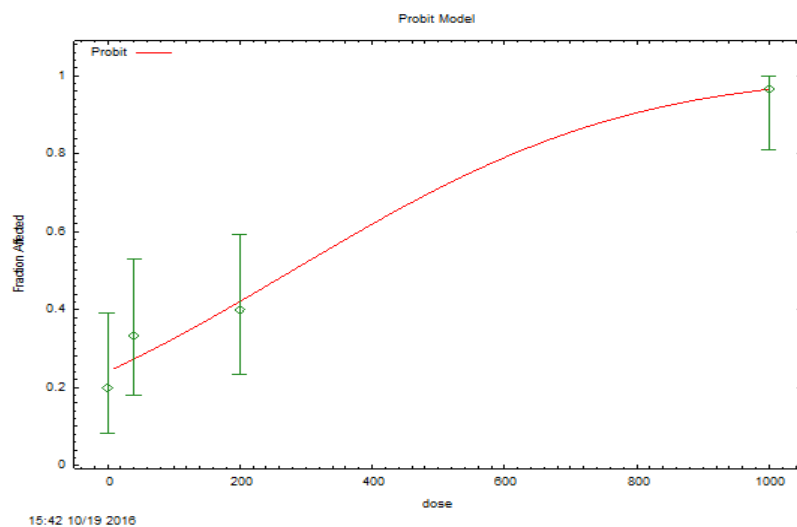


Fig. 2. Best-fit dose-response model (Probit) of data of chronic inflammation (chronic toxicity) from Fawell et al. (1999) by BMDS software.

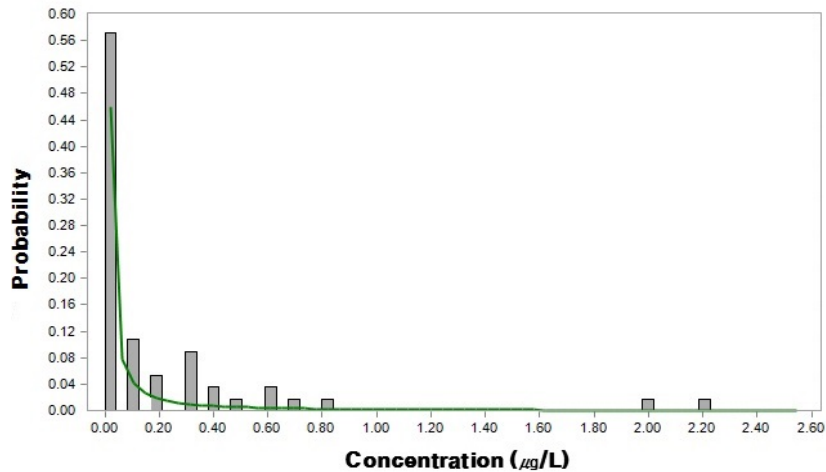


Fig. 3. Probability distribution of microcystin-LR concentration in the raw water of 14 water purification plants in Nakdong River watershed.

통하여 microcystin-LR에 하루 동안 노출되었을 때 간세포 손상 증상의 위해성을 성별, 연령별로 나타낸 결과이다. X축은 간세포 손상이 관찰될 확률 (0.00-1.00, 0.00 = 0%, 1.00 = 100%)을 Y축은 10만 번의 시뮬레이션에서 그 확률이 일어나는 빈도 (0-100, 0 = 0, 100 = 100,000)을 나타낸다. 또한 각각의 경우에 대해서 원수에서의 위해성과 각각의 정수 단계를 거치면서 변화하는 위해성을 표시하였다. 즉 A는 원수, B는 착수정 이후, C는 혼화/응집/침전 이후, D는 여과 이후, E는 오존처리 이후, F는 입상활성탄 처리 이후의 위해성을 나타낸다.

Fig. 4에서 보는 바와 같이 아무런 처리를 처리하지 않은 원수에서도 (만약 아무런 처리를 하지 않은 원수를 그대로 마셨다고 가정하면) 5% 미만의 성인 남성들에게 5% 미만의 위해성이 있는 것으로 나타났다. 하지만 이러한 위해성은 정수단계를 거치면서 점차 감소하여 오존처리를 거치고 나면 그 위해성이 거의 없는 것으로 판명되었다.

간세포 손상의 위해성은 성별로는 큰 차이를 보이지는 않았지만 연령별로는 성인(Fig. 4와 6)보다는 8세 어린이(Fig. 5와 7)에게서 약간 더 높은 것으로 나타났다. 하지만 이 경우에도 정수처리과정을 거치면서 점차 감소하였으며 오존처리 이후에는 그 위해성이 거의 없는 것으로 판명되었다.

Figs. 8-11은 주어진 노출 시나리오대로 수돗물을 통하여 microcystin-LR에 하루 동안 노출되었을 때 만성 간 염증의 위해성을 성별, 연령별로 나타낸 결과이다. 앞의 간세포 손상 때와 같이 여기에서도 각각의 경우에 대해서 원수에서의 위해성과 각각의 정수 단계를 거치면서 변화하는 위해성을 표시하였다. 그림들에서 보는 바와 같이 급성 독성인 간세포 손상에 비해 비교적 오랜 시간 동안의 노출을 필요로 하는 만성 독성인 만성 간 염증은 그 위해성이 하루 동안의 노출에서는 현저히 낮은 것으로 나타났다. 즉, 만성 간 염증의 위해성은 정수 과정을 거치지 않은 원수를 그대로 마실 경우에는 1% 미만으로 나타났으나, 정수과정을 거치면서 감소하여, 오존처리 후 완전 제거 시 위해성은 없는 것으로 나타났다.

또한 간세포 손상의 경우와 같이 만성 간 염증의 경우에도 성별에 따른 차이는 거의 없었으나, 연령대별 차이는 다소 있는 것으로 나타났다. 즉, 성인(Fig. 8과 Fig. 10)보다는 8세 어린이(Fig. 9와 Fig. 11)에 대해 약간 높은 위해성이 있는 것으로 나타났다. 하지만 어떤 경우에건 정수처리과정을 거치면서 그 위해성이 거의 없는 것으로 판명되었다.

3.3.1.2. 한 달 동안 노출 시의 위해성

Figs. 12-15는 주어진 노출 시나리오대로 수돗물을

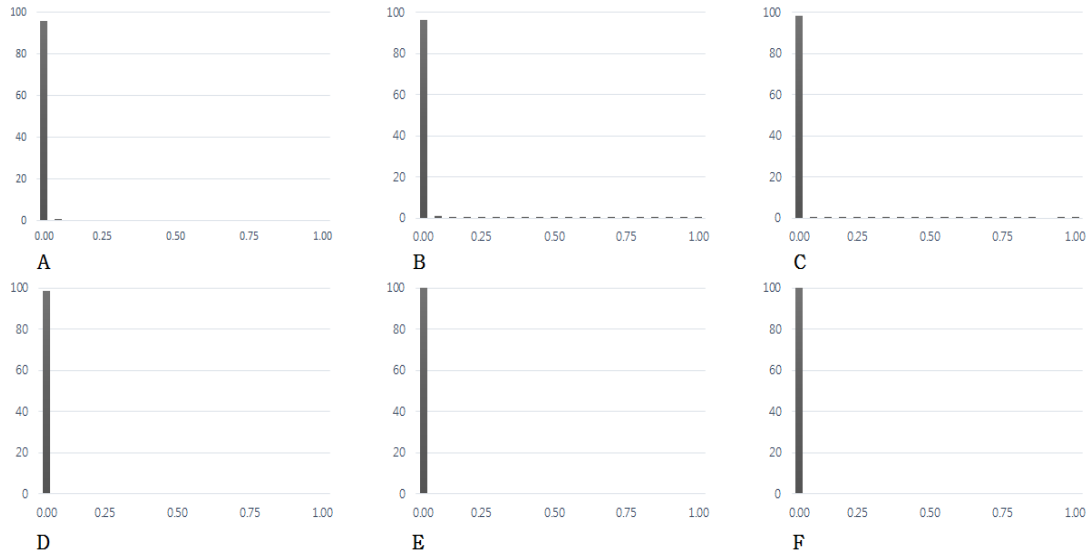


Fig. 4. Risk of hepatocyte lesion (adult male) for 1-day exposure to A: Raw water, B: Gauging well, C: After mixing/flocculation/coagulation, D: After filtration, E: After ozonation, F: After GAC adsorption.

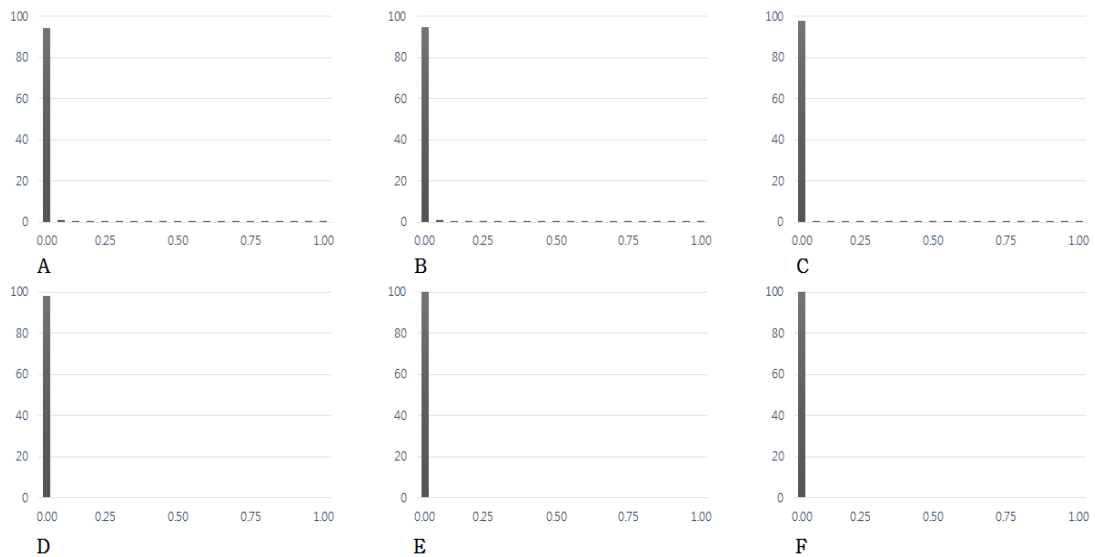


Fig. 5. Risk of hepatocyte lesion (8-year old male) for 1-day exposure to A: Raw water, B: Gauging well, C: After mixing/flocculation/coagulation, D: After filtration, E: After ozonation, F: After GAC adsorption.

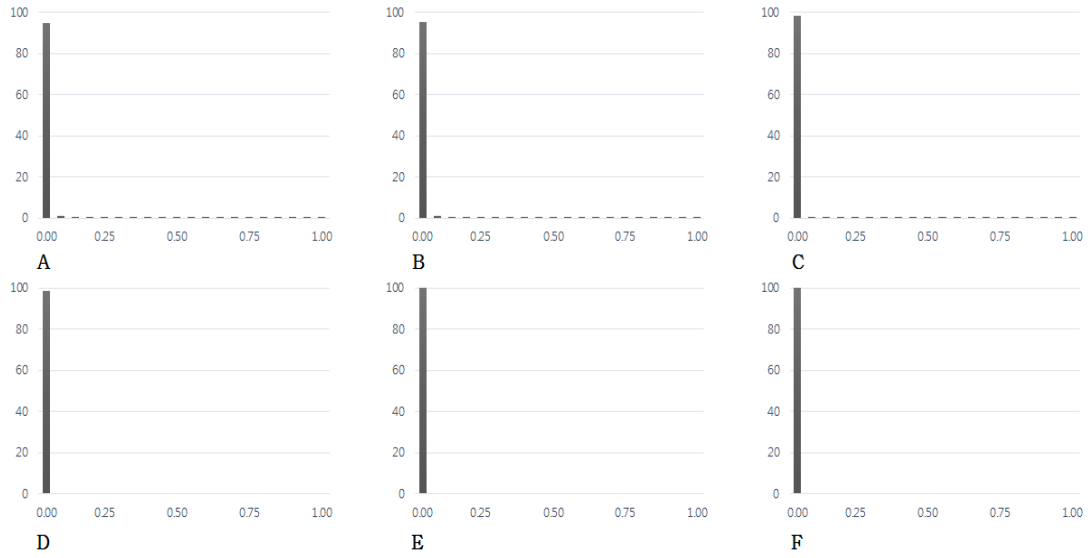


Fig. 6. Risk of hepatocyte lesion (adult female) for 1-day exposure to A: Raw water, B: Gauging well, C: After mixing/flocculation/coagulation, D: After filtration, E: After ozonation, F: After GAC adsorption.

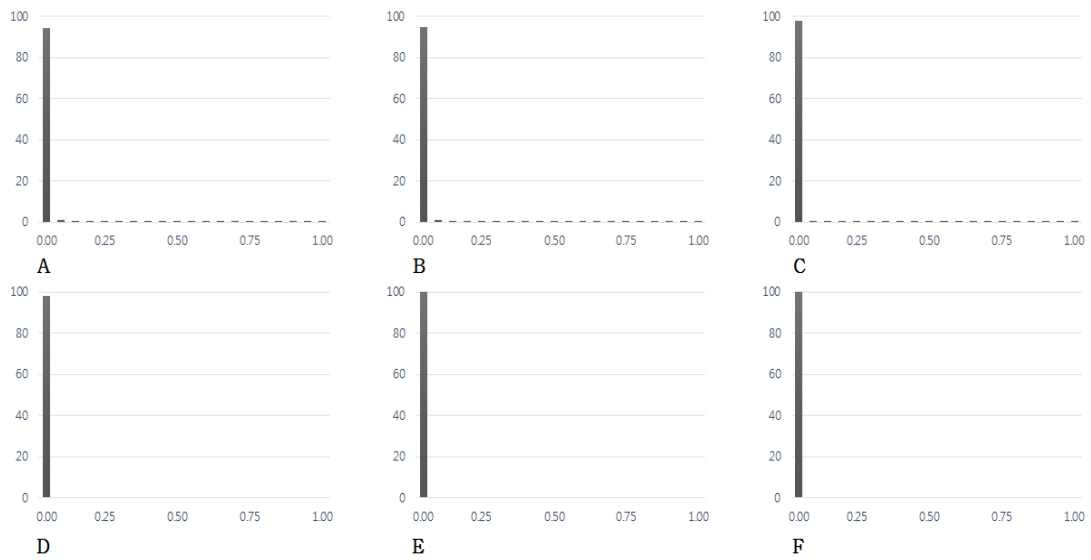


Fig. 7. Risk of hepatocyte lesion (8-year old female) for 1-day exposure to A: Raw water, B: Gauging well, C: After mixing/flocculation/coagulation, D: After filtration, E: After ozonation, F: After GAC adsorption.

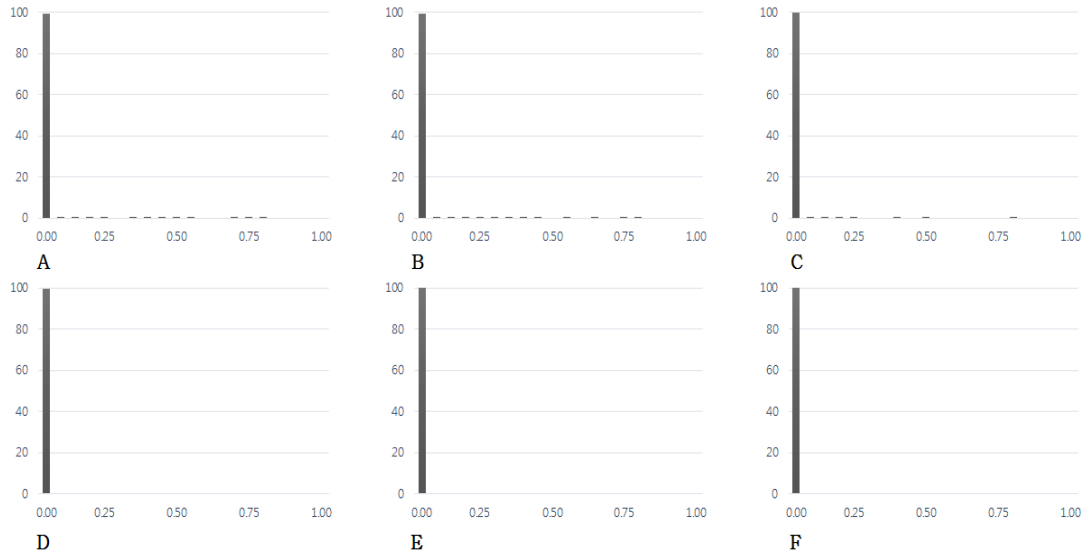


Fig. 8. Risk of chronic liver inflammation (adult male) for 1-day exposure to A: Raw water, B: Gauging well, C: After mixing/flocculation/coagulation, D: After filtration, E: After ozonation, F: After GAC adsorption.

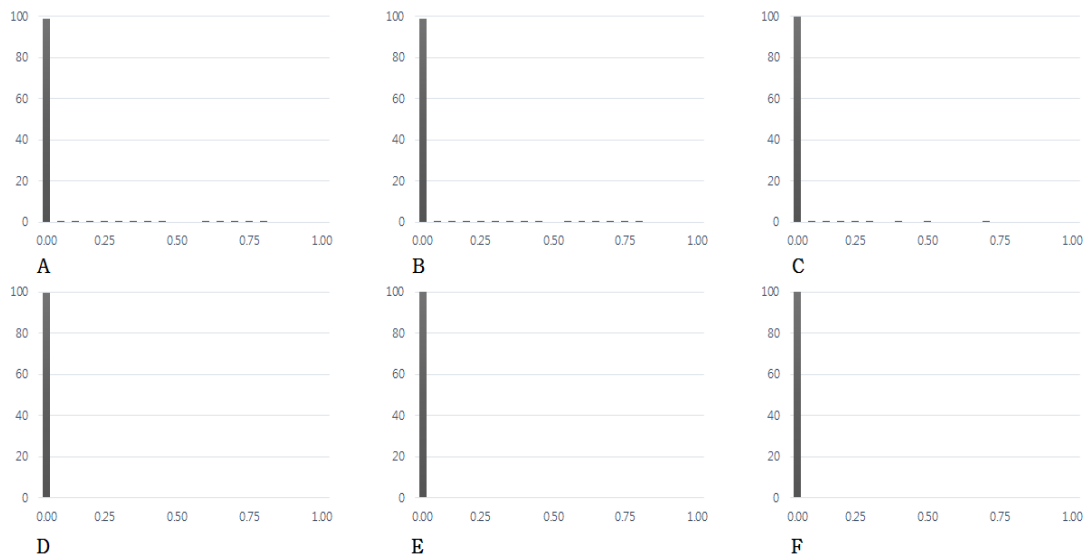


Fig. 9. Risk of chronic liver inflammation (8-year old male) for 1- day exposure to A: Raw water, B: Gauging well, C: After mixing/flocculation/coagulation, D: After filtration, E: After ozonation, F: After GAC adsorption.

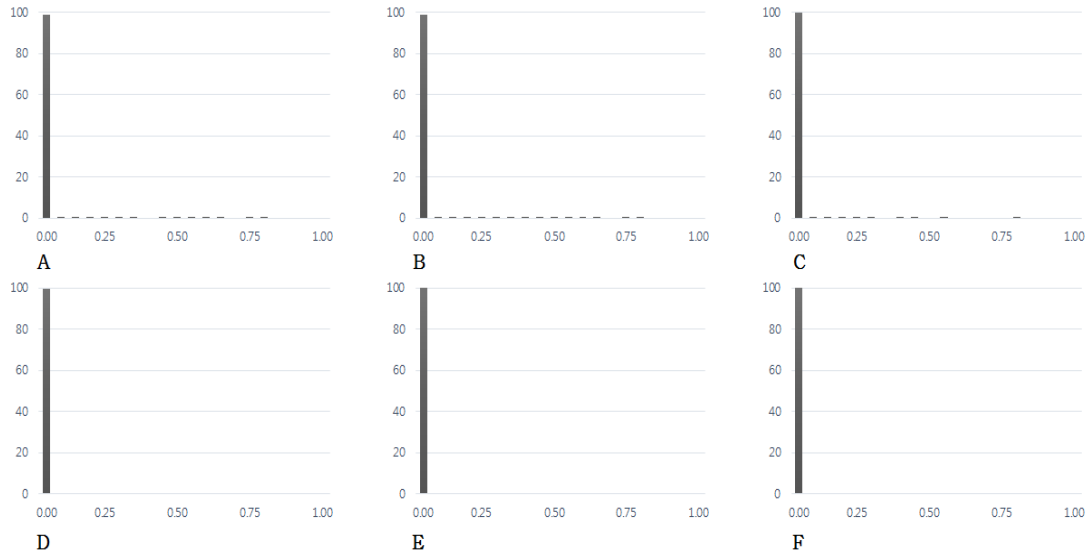


Fig. 10. Risk of chronic liver inflammation (adult female) for 1-day exposure to A: Raw water, B: Gauging well, C: After mixing/flocculation/coagulation, D: After filtration, E: After ozonation, F: After GAC adsorption.

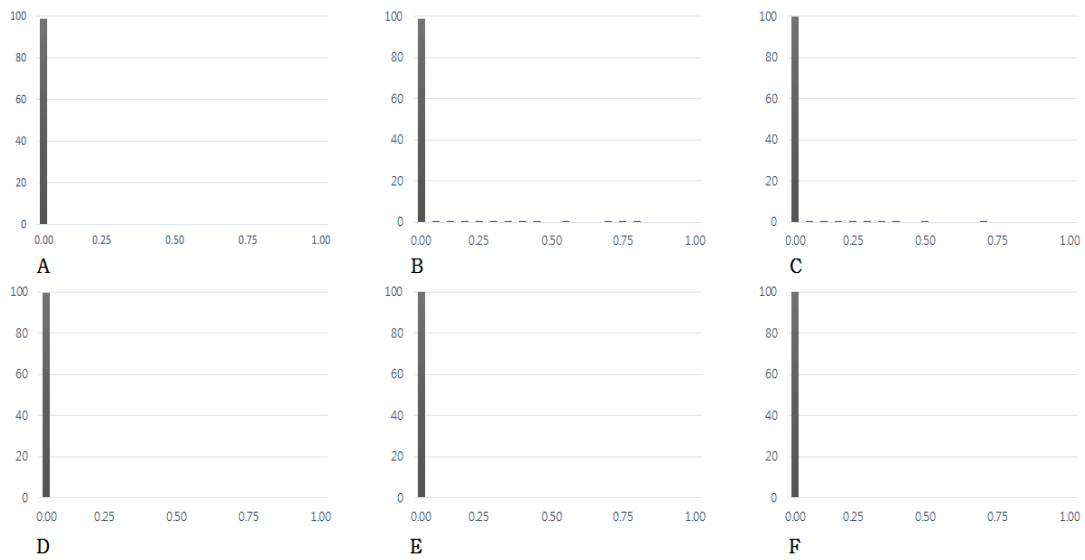


Fig. 11. Risk of chronic liver inflammation (8-year old female) for 1-day exposure to A: Raw water, B: Gauging well, C: After mixing/flocculation/coagulation, D: After filtration, E: After ozonation, F: After GAC adsorption.

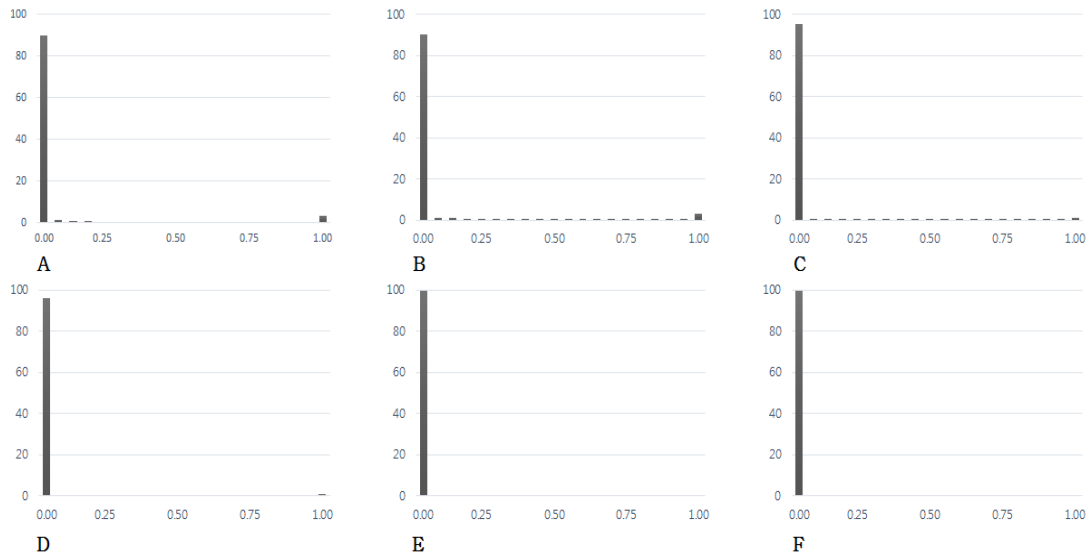


Fig. 12. Risk of hepatocyte lesion (adult male) for 1-month exposure to A: Raw water, B: Gauging well, C: After mixing/flocculation/coagulation, D: After filtration, E: After ozonation, F: After GAC adsorption.

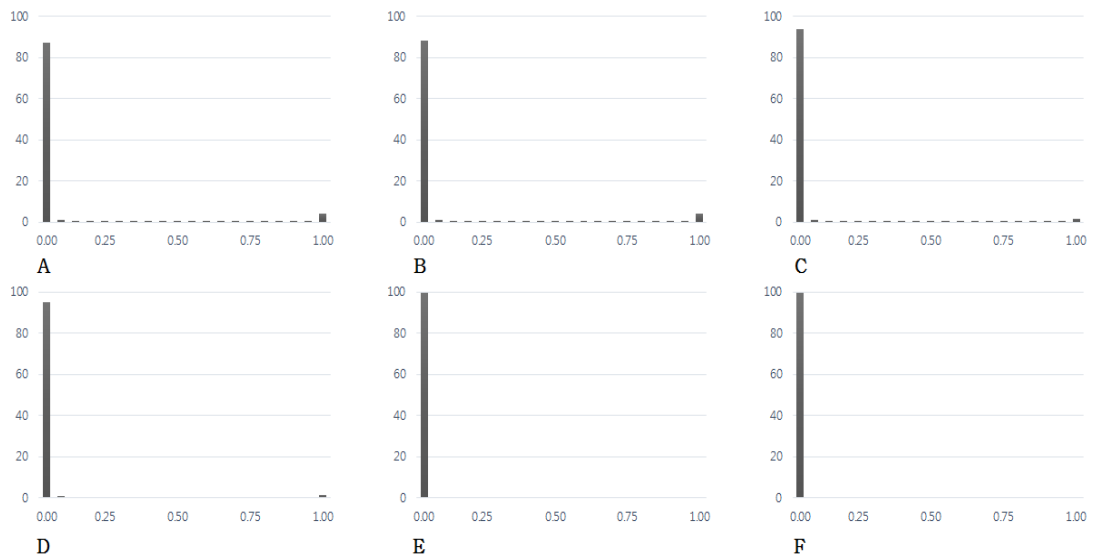


Fig. 13. Risk of hepatocyte lesion (8-year old male) for 1-month exposure to A: Raw water, B: Gauging well, C: After mixing/flocculation/coagulation, D: After filtration, E: After ozonation, F: After GAC adsorption.

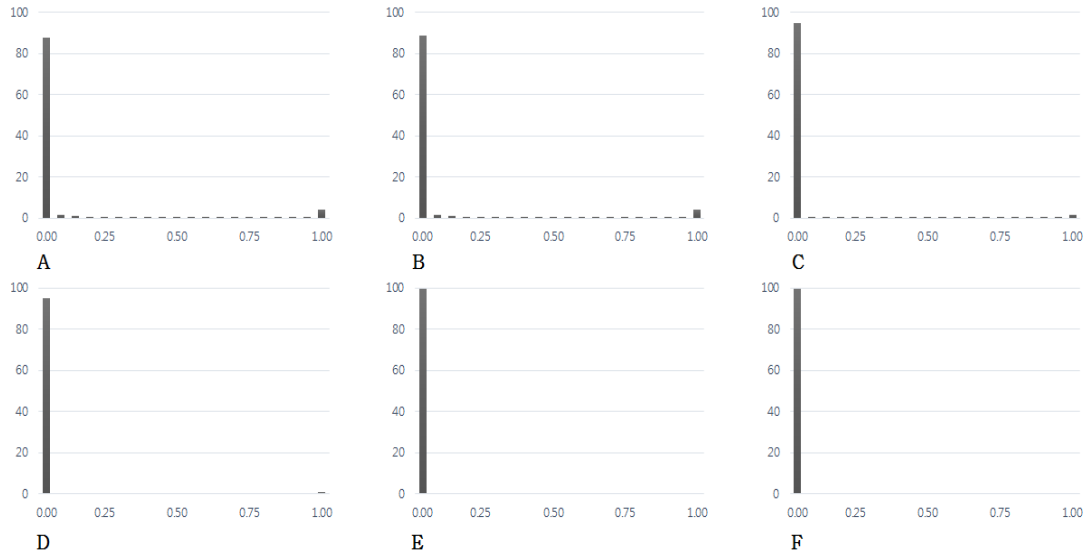


Fig. 14. Risk of hepatocyte lesion (adult female) for 1-month exposure to A: Raw water, B: Gauging well, C: After mixing/flocculation/coagulation, D: After filtration, E: After ozonation, F: After GAC adsorption.

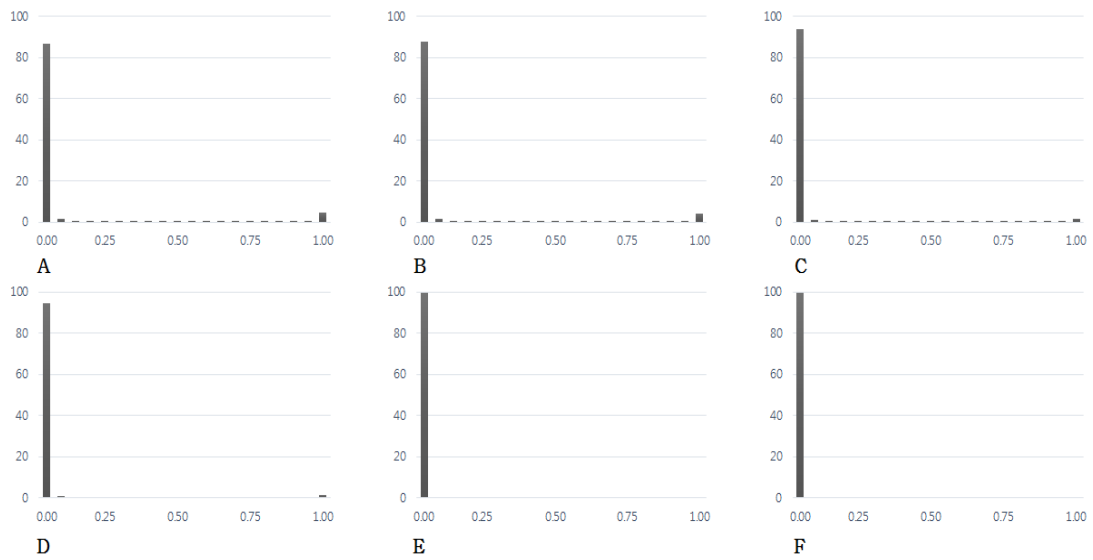


Fig. 15. Risk of hepatocyte lesion (8-year old female) for 1-month exposure to A: Raw water, B: Gauging well, C: After mixing/flocculation/coagulation, D: After filtration, E: After ozonation, F: After GAC adsorption.

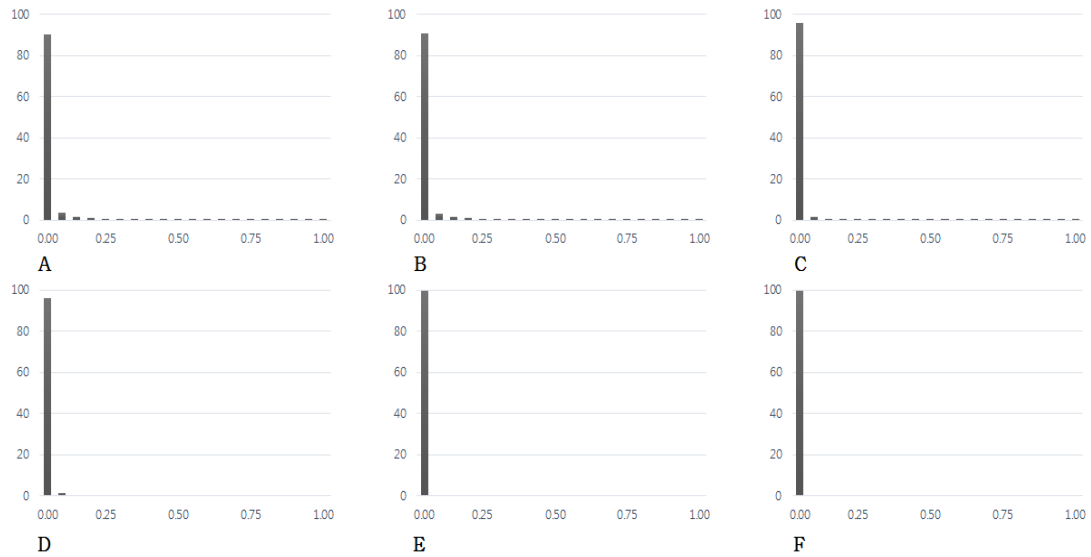


Fig. 16. Risk of chronic liver inflammation (adult male) for 1-month exposure to A: Raw water, B: Gauging well, C: After mixing/flocculation/coagulation, D: After filtration, E: After ozonation, F: After GAC adsorption.

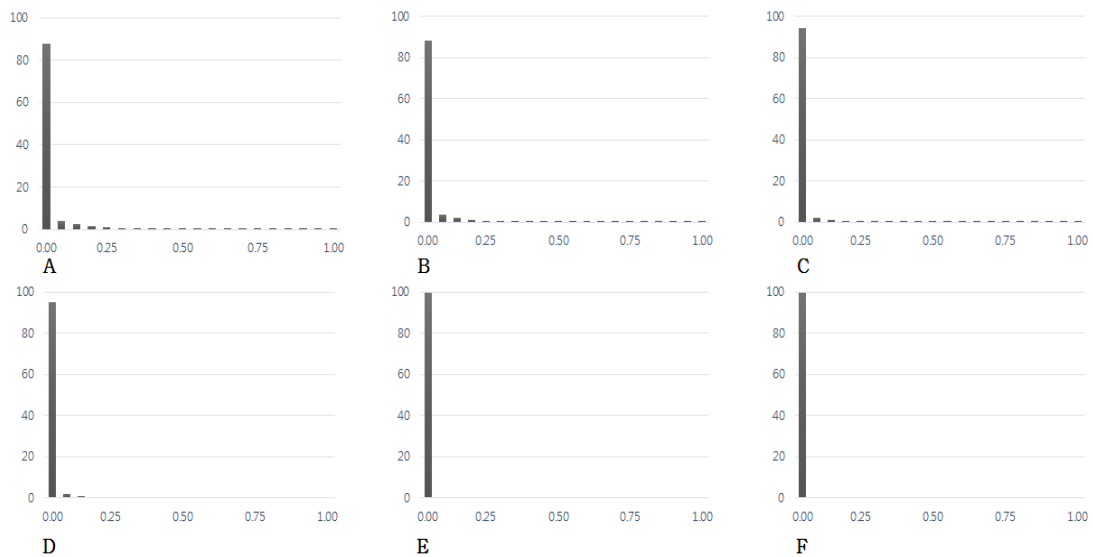


Fig. 17. Risk of chronic liver inflammation (8-year old male) for 1-month exposure to A: Raw water, B: Gauging well, C: After mixing/flocculation/coagulation, D: After filtration, E: After ozonation, F: After GAC adsorption.

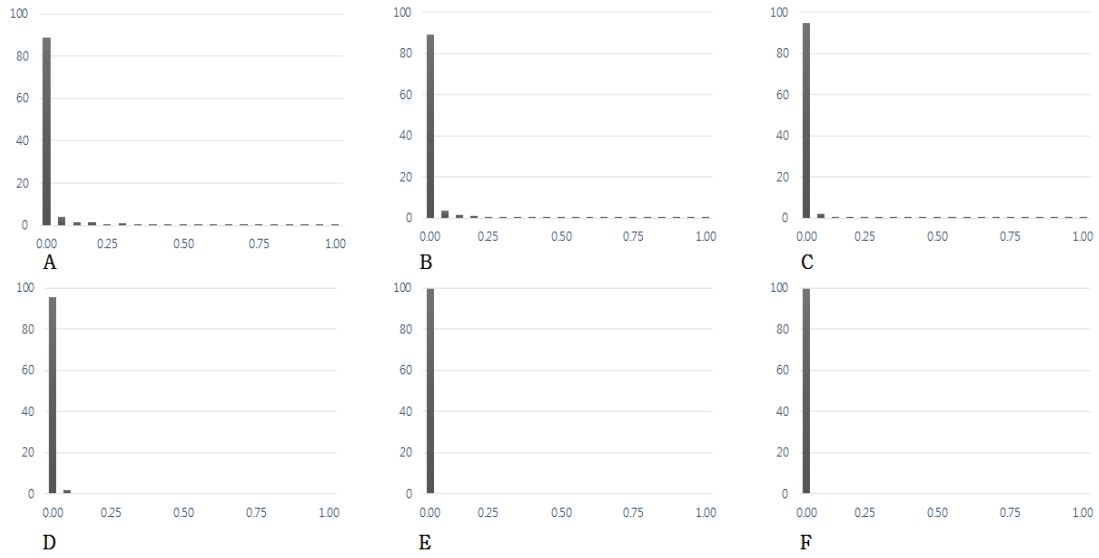


Fig. 18. Risk of chronic liver inflammation (adult female) for 1-month exposure to A: Raw water, B: Gauging well, C: After mixing/flocculation/coagulation, D: After filtration, E: After ozonation, F: After GAC adsorption.

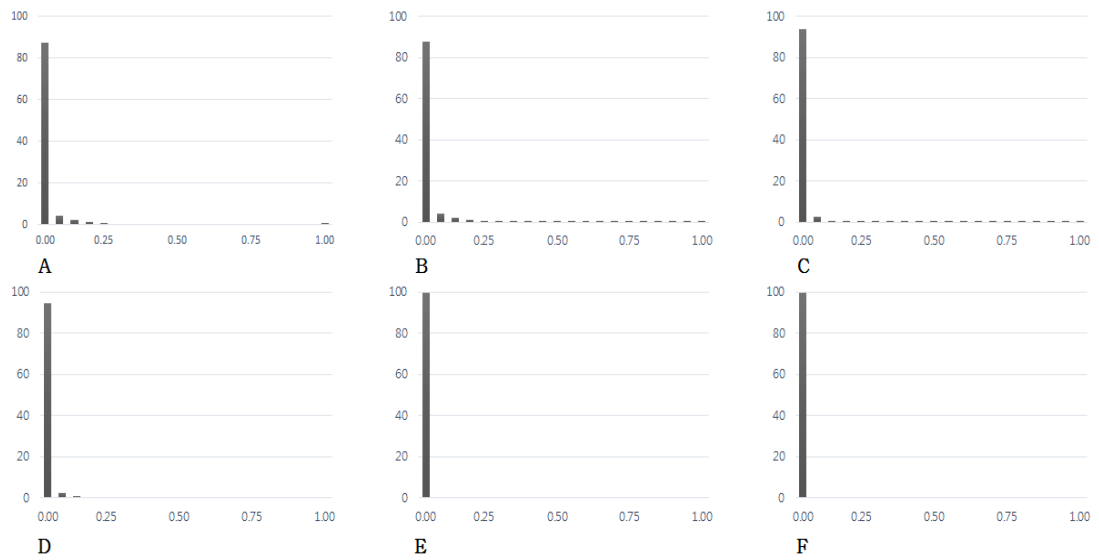


Fig. 19. Risk of chronic liver inflammation (8-year old female) for 1-month exposure to A: Raw water, B: Gauging well, C: After mixing/flocculation/coagulation, D: After filtration, E: After ozonation, F: After GAC adsorption.

통하여 microcystin-LR에 한 달 동안 노출되었을 때 간세포 손상의 위해성을 성별, 연령별로 나타낸 결과이다. 여기에서도 각각의 경우에 대해서 원수에서의 위해성과 각각의 정수단계를 거치면서 변화하는 위해성을 표시하였다. 한 달 간이라는 장기간의 노출이라 하루 동안만 노출되었을 때 보다 다소 높은 위해성을 보였다. Fig. 12에서 보는 바와 같이 아무런 처리를 처리하지 않은 원수에서도(만약 아무런 처리를 하지 않은 원수를 그대로 마셨다고 가정하면) 약 10% 정도의 사람들에게 위해성이 있었다. 이것은 하루 동안 노출되었을 때의 위해성 - 소수 (<< 5%)의 성인 남성 - 에 비하여 높은 위해성이었다. 또한 하루 동안 노출되었을 경우와 달리 이 경우에는 발병확률이 100%에 가까운 고위험군도 존재하였다. 하지만 이러한 위해성도 정수단계를 거치면서 점차 감소하여 오존처리를 거치고 나면 그 위해성이 거의 없는 것으로 판명되었다.

하루 동안의 노출에 의한 경우와 같이 한달 동안의 노출에 의한 간세포 손상의 위해성도 성별로는 큰 차이를 보이지는 않았지만 연령별로는 성인(Fig. 12와 Fig. 14)보다는 8세 어린이(Fig. 13과 Fig. 15)에게서 1.5배 정도 높은 것으로 나타났다. 하지만 이 경우에도 그 위해성은 정수처리과정을 거치면서 점차 제거되어 오존 처리를 거치고 나면 그 위해성은 거의 없는 것으로 판명되었다.

Figs. 16-19는 주어진 노출 시나리오대로 수돗물을 통하여 microcystin-LR에 한 달 동안 노출되었을 때 만성 간 염증의 위해성을 성별, 연령별로 나타낸 결과이다. 급성 독성인 간세포 손상과 같이 만성 독성인 간 염증도 한 달 간이라는 장기간의 노출이라 하루 동안만 노출되었을 때 보다 다소 높은 위해성을 보였다. Fig. 16에서 보는 바와 같이 아무런 처리를 처리하지 않은 원수에서도(만약 아무런 처리를 하지 않은 원수를 그대로 마셨다고 가정하면) 약 10% 정도의 사람들에게 위해성이 있었다. 이것은 하루 동안 노출되었을 때의 위해성 - 극소수 (< 1%)의 성인 남성 - 에 비하여 상당히 높은 위해성이었다. 하지만 급성 독성인 간세포 손상의 경우와는 달리 만성 간 염증에는 발병확률이 높은 고위험군은 존재하지 않았다. 어떠한 경우에도 만성 간 염증의 위해성도 정수단계를 거치면서 점차 감소하여 오존처리를 거치고 나면 그 위해성이 거

의 없는 것으로 판명되었다.

급성 독성인 간세포 손상과 같이 만성 독성인 간 염증에서도 성별로는 큰 차이를 보이지는 않았지만 연령별로는 성인(Fig. 16과 Fig. 18)보다는 8세 어린이(Fig. 17과 Fig. 19)에게서 1.5배 정도 높은 것으로 나타났다. 하지만 이 경우에도 그 위해성은 정수처리과정을 거치면서 점차 제거되어 오존 처리를 거치고 나면 그 위해성은 거의 없는 것으로 판명되었다.

4. 고찰

이 연구에서는 수돗물을 통한 녹조독소의 노출에 의한 인체위해성을 급성독성인 간세포 손상과 만성 독성인 간 염증에 대해 각각 조사하였으며, 또한 하루 동안의 단기간 노출 뿐 한 달 동안의 장기간의 노출 시의 위해성도 조사하였다. 예상한 바와 같이 녹조 독소를 함유한 원수를 그냥 마신다고 가정된 사례에서는 한 달 동안의 장기간의 노출에서는 급성 독성과 만성 독성 모두 그 위해성이 높았으며, 특히 급성 독성의 경우에는 적은 수이기도 하지만 고위험군도 존재하였다. 그렇지만 이러한 위해성도 정수단계를 거치면서 점차 감소하여 최종 처리수에는 그 위해성이 거의 없는 것으로 판명되었다. 또한 이 연구에서는 성인남녀들 뿐만 아니라 초등학교 저학년 남녀어린이에 대한 수돗물을 통한 녹조독소에의 노출에 의한 인체위해성을 평가하였다. 녹조독소에의 노출에 의한 인체위해성은 성별로는 큰 차이를 보이지는 않았지만 연령별로는 성인보다는 8세 어린이에게서 1.5배 정도 높은 것으로 나타났다. 하지만 어린이에 대한 이러한 위해성도 이러한 위해성도 정수단계를 거치면서 점차 감소하여 최종 처리수에는 그 위해성이 거의 없는 것으로 판명되었다.

낙동강 수계의 14개의 정수장에서 공급하는 수돗물을 통한 녹조독소(microcystin-LR)의 노출에 의한 인체위해성을 측정된 결과 위해성이 거의 없는 것으로 나타났다. 현재 낙동강 수계는 우리나라에서 녹조 발생이 가장 빈번하고 심각한 지역이므로 상대적으로 녹조 발생이 적은 우리나라의 다른 수계에서 공급하는 수돗물을 통한 녹조독소(microcystin-LR)의 노출에 의한 인체위해성도 그리 크지 않을 것이라 추론할 수

있다. 하지만, 이 연구에서는 원수에서의 microcystin-LR의 농도가 낙동강 수계의 대부분의 정수장에서 운영하고 있는 고도정수처리시설을 통하여 단계적으로 제거된다고 가정하였다. 하지만 아직 우리나라에는 고도정수처리 시설을 가지지 않은 정수장이 많이 존재하며 이들 정수장에서 공급되는 수돗물을 통한 녹조독소(microcystin-LR)의 노출에 의한 인체위해성은 이 연구에서 예측된 것보다 클 것으로 예상된다. 또한 이 연구에서는 환경부의 보도자료를 바탕으로 정수단계를 착수정수, 혼화/응집/침전, 여과, 오존처리, 입상활성탄 처리의 5단계로 나누고, 각각의 단계에서 microcystin-LR농도가 10, 70, 75, 99, >99%가 제거된다고 가정하였다. 하지만 정수처리 단계에서의 microcystin-LR의 제거 정도는 개별 정수장의 원수의 물리적, 화학적 조성, 개별 정수처리단계의 처리조건 등에 많은 영향을 받으므로 개별 정수장에서의 microcystin-LR의 제거정도에도 차이가 있을 수 있으며, 그에 따라 개별 정수장에서 수돗물을 통한 녹조독소(microcystin-LR)의 노출에 의한 인체위해성도 차이가 있을 수 있다.

또한 이번 연구에서 사용한 원수에서의 microcystin-LR의 농도는 낙동강 수계에서 2016년 8월 한 달 동안 측정된 값이었다. 많은 전문가들이 앞으로 우리나라에 기후변화의 영향으로 현재보다 훨씬 심각한 녹조현상이 일어날 수 있다고 예측하고 있다. 그럴 경우 원수에서의 녹조독소의 농도도 이번 연구에서 보다 한층 높아질 가능성이 있으며, 그에 따라 수돗물을 통한 녹조독소(microcystin-LR)의 노출에 의한 인체위해성이 현재보다 더 높아져서 우려할 만한(unacceptable) 수준으로 올라갈 가능성도 배제할 수 없다.

끝으로 이 연구에서는 여러 녹조독소 중에서 microcystin-LR에 의한 급성 독성(간세포 손상)과 만성독성(만성 간 염증)에 대한 인체위해성을 측정하였다. 앞에서 언급한 바와 같이 남조류들은 인체에 유해한 수십 종의 독소를 생성하며, 이들 독소들은 간이나 신경계 뿐 아니라 다른 여러 신체기관에 나쁜 영향을 끼치는 것으로 알려져 있다. 그러므로 이들 다양한 독소에 의한 여러 신체 기관에 대한 위해성은 아직 밝혀져 있지 않은 것이 사실이다. 이들 여러 다른 종류의 독소에 의한 다른 종류의 인체위해성이 밝혀지기 위

해서는 이들 독소에 의한 정량적인 용량-반응 평가 실험과 함께 상수 원수에서의 이들 독소들의 농도, 각각의 정수처리 단계에서의 제거효율, 최종처리수에서의 농도 등 많은 연구가 선행되어야 하는 실정이다. 그러므로 여러 다른 독소에 의한 다양한 인체위해성이 밝혀지기 전에는 앞으로도 우리나라 수계에서의 녹조발생의 억제, 고도정수처리 설비의 도입, 그리고 정수장에서의 녹조독소의 효율적인 모니터링 시스템이 지속적으로 필요할 것으로 생각된다.

5. 결론

낙동강 수계의 14개의 정수장에서 공급하는 수돗물을 통한 녹조독소(microcystin-LR)의 노출에 의한 인체위해성을 정량적으로 측정하였다. 낙동강 수계에서 수돗물을 통한 녹조독소의 노출에 의한 인체위해성은 아주 낮은 것으로 나타났다. 비록 정수장의 처리되지 않은 원수에는 미량의 녹조독소가 존재하고 그에 따른 인체위해성이 다소 존재하였으나, 이러한 인체위해성도 현재 시행하고 있는 고도정수처리를 통하여 무시할 수 있는 수준으로 감소하는 것으로 나타났다. 하지만 다른 많은 위해성평가의 경우와 같이 이 연구에서도 여러 가정과 그로 인한 불확실성이 존재한다. 그러므로 이 연구의 결과를 다른 경우에 일반화시키는데는 각별한 주의를 요구한다.

감사의 글

이 연구는 한국과학기술원(KIST)의 2015년도 개방형연구사업(Open Research Program)과 환경부 글로벌 탐 환경기술개발사업(E616-00211-0608-0)의 지원으로 이루어졌다. 이 연구의 저자들은 이 연구 초기에 자료수집과 정리, 그리고 여러 소프트웨어의 장착을 도와준 아주대학교 환경공학과 졸업생 이상현, 최인하, 그리고 아주대학교 환경안전공학과 이지형 학생에게 감사드린다.

REFERENCES

- Amorim, A., Vasconcelos, V., 1999, Dynamics of microcystins in the mussel *Mytilus galloprovincialis*, *Toxicon.*, 37(8), 1181-1185.

- Carmichael, W. W., Saffermann, R. S., 1992, A Status report on planktonic cyanobacteria (blue-green algae) and their toxins, EPA/600/R-92/079, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D. C., U.S.A.
- Codd, G. A., Metcalf, J. S., Beattie, K. A., 1999, Retention of *Microcystis aeruginosa* and microcystins by salad lettuce (*Lactuca sativa*) after spray irrigation with water containing cyanobacteria, *Toxicol.*, 37(8), 1181-1185.
- Dawson, R. M., 1998, The toxicology of microcystins, *Toxicol.*, 36(7), 953-962.
- Dow, C. S., Swoboda, U. K., 2000, Cyanotoxins. Whitton, B. A., Potts, M. (eds.), *The Ecology of Cyanobacteria*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 613-632.
- Francis, G., 1878, Poisonous Australian lake, *Nature*, 18, 11-12.
- Falconer, I. R., Bersford, A. M., Runnegar, M. T. C., 1983, Evidence of liver damage by toxin from a bloom of the blue-green alga, *Microcystis aeruginosa*, *Med. J. Aus.*, 1, 511-514.
- Fawell, J. K., Mitchell, R. E., Everett, D. J., Hill, R. E., 1999, The toxicity of cyanobacterial toxins in the mouse: I Microcystin-LR, *Hum. Exp. Toxicol.*, 3(18), 162-167.
- Fitzgerald, D. J., 2001, Cyanotoxins and human health – overview, In: Chorus, I. (ed.), *Cyanotoxins – occurrence, causes, consequences*, Springer, Berlin, 179-190.
- Heinze, R., 1999, Toxicity of the cyanobacterial toxin microcystin-LR to rats after 28 days intake with drinking water, *Environ. Toxicol.*, 14(1), 57-60.
- Jochimsen, E. M., Carmichael, W. W., An, J. S., Cardo, D. M., Cookson, S. T., Holmes, C. E. M., Antunes, B. C., Melo Filho, D. A., Lyra, T. M., Barreto, V. S. T., Sandra, M. F. O., Azevedo and Jarvis, W. R., 1998, Liver failure and death after exposure to microcystins at a Hemodialysis Center in Brazil, *N. Engl. J. Med.*, 338, 873-878.
- Kearns, K. D., Hunter, M. D., 2001, Toxin-producing *Anabaena flos-aquae* induces settling of *Chlamydomonas reinhardtii*, a Competing Motile Alga, *Microb. Ecol.*, 42, 80-86.
- Korean Ministry of Environment press release, 2016, Drinking water, Safe to drink, No cyanotoxin detected in drinking water in the last five years August 31, Sejong.
- National Research Council (NRC), 1983, Risk assessment in the federal government : Managing the Process, National Academy Press, Norman Grossblatt (ed.), Washington, DC.
- Pouria, S., de Andrade, A., Barbosa, J., Cavalcanti, R. L., Barreto, V. T. S., Ward, C. J., Preiser, W., Poon, G. K., Neild, G. H., Codd, G. A., 1998, Fatal microcystin intoxication in haemodialysis unit in Caruaru, Brazil, *The Lancet*, 352, 21-26.
- Schaeffer, D. J., Malpas, P. B., Barton, L. L., 1999, Risk assessment of microcystin in dietary *Aphanizomenon flos-aquae*, *Ecotox. Environ. Safe*, 44(1), 73-80.
- Ueno, Y., Nagata, S., Tsutsumi, T., Hasegawa, A., Watanabe, M. F., Park, H. D., Chen, G., Yu, S. Z., 1996, Detection of microcystin, a blue-green algal hepatotoxin, in drinking water sampled in Haimen and Fusui, endemic areas of primary liver cancer in China, by highly sensitive immunoassay, *Carcinogenesis*, 17(6), 1317-1321.
- United States Environmental Protection Agency (US EPA), 2000, Methodology for deriving ambient water quality criteria for the protection of human health, EPA Report, EPA822-B-00-004, Washington, DC.
- Williams, D. E., Dawe, S. C., Kent, M. L., Andersen, R. J., Craig, M., Holmes, C. F. B., 1997, Bioaccumulation and clearance of microcystins from salt water mussels, *Mytilus edulis*, and in vivo evidence for covalently bound microcystins in mussel tissues, *Toxicol.*, 35(11), 1617-1625.
- World Health Organization, 1998, Cyanobacterial toxins : Microcystin-LR, In: *Guidelines for drinking water quality*, 2nd Edition, Addendum to Vol. 2, Health criteria and other supporting information, World Health Organization, Geneva, Switzerland, 95-110.
- WHO, 1999, Toxic cyanobacteria in water : A Guide to their public health consequences, monitoring, and management, World Health Organization, Geneva, Switzerland.
- WHO, 2003, Algae and cyanobacteria in fresh water, In: *Guidelines for safe recreational water environments*, Vol. 1: Coastal and fresh waters, World Health Organization, Geneva, Switzerland, 136-158.
- Zhou, L., Yu, H., Chen, K., 2002, Relationship between microcystin in drinking water and colorectal cancer, *Biome. Environ. Sci.*, 15(2), 166-171.