

연구노트

먹는물에서 구리기준 설정 타당성

유순주 · 정동환 · 김준환*

국립환경과학원, 워트랩*

(2008년 3월 4일 접수, 2008년 4월 21일 승인)

Valid Assessment for Copper Standard Establishment in Drinking Water

Soon-Ju Yu · Dong-Hwan Jeong · Jun-Hwan Kim*

National Institute of Environmental Research, WatLab*

(Manuscript received 4 March 2008; accepted 21 April 2008)

Abstract

As the NOAFL of copper based on liver toxicity in the human body is set and the TDI of copper is lower, it is necessary to strengthen the drinking water standard of copper according to toxic effects and the TDI of copper in humans. It is difficult to calculate the accurate drinking water standard because of the part of uncertainty for chronic effects of acute human with Wilson's disease and baby in the current studies. In order to improve the drinking water standard of copper considering of liver toxicity, it is desired to set the drinking water standard with concerning of the revising tendency in the foreign countries such as US, EC and WHO.

Key words : NOAEL (No-Observed Adverse Effect Level), TDI (Tolerable Daily Intake), Drinking Water Standard, Liver Toxicity, Copper

1. 서론

일반적으로 구리는 전선, 동관, 집기, 화학기계, 건축자재, 피복제, 여러 종류의 합금 등에 널리 사용되고 있으며, 주철관이나 철관에 비하여 내식성, 내산성이 강하기 때문에 가정용 수도배관으로 사용되고 있다. 또한 구리 화합물은 약취제, 살균제, 살조제, 살충제, 탈취제, 도금제, 염료, 인쇄, 사료 첨가제, 식품첨가제로 일상생활에 널리 사용되고

있다(WHO, 1998; 日本水道協會, 1993).

2006년 하이닉스 반도체 증설 공장 이전 문제로 구리에 대한 관심이 고조되면서 구리에 대한 인체 유해성과 수생태계에 미치는 위해성에 대하여 논란이 있어 왔다. 미국 EPA 먹는물 수질기준은 1.3 mg/L이나 수환경에서 구리기준은 수생태계 수생생물에 대한 독성과 생물농축을 고려하여 구리 급성독성농도를 13.0 $\mu\text{g/L}$, 만성독성농도는 9.0 $\mu\text{g/L}$ (EPA, 2005)로 권고하고 있다. 따라서 담수에

서의 구리기준은 먹는물 수질기준과 달리 수생생물의 평생 동안 먹이사슬을 통한 축적영향으로 기준치를 더 낮게 설정하고 있다. 우리나라는 수질환경기준에 수생태계 보호를 위하여 구리의 농도기준은 설정되어 있지 않으며 다만 구리는 배출허용기준에서 청정지역이 1.0 mg/L, 가, 나, 특례 지역이 3 mg/L를 정하고 있다. 우리나라 먹는물 수질기준은 건강유해성과 심미적 영향의 두 가지 측면만을 고려하여 구리의 경우 심미적 영향물질에 관한 기준으로 1 mg/L를 정하고 있다. 이와 같이 최근 구리의 생태계에 미치는 유해성 논란과 함께 미국에서는 구리를 과잉 섭취하면 간장해가 일어나 성인의 섭취상한량을 낮추어 결정하고 있으며(ATSDR, 2004 ; EC 2003) 유럽연합에서도 사람의 간 장해를 근거로 산출된 NOAEL을 적용하여 섭취상한량(Tolerable Upper Intake Level)을 5 mg/day (EC, 2003)로 구리가 사람에 대한 간 장해를 근거로 섭취상한량을 감소시키고 있어 인체의 유해성 측면으로 검토가 되고 있는 실정이다. 따라서 본 고에서 미국 등 선진외국에서 구리의 유해성을 토대로 섭취량권장량의 변화 추이와 먹는물 수질기준 설정 배경을 조사하여 우리나라의 먹는물 수질기준의 타당성을 검토하고자 한다.

II. 구리의 분포현황 및 유해성

1. 상수원수 및 수돗물에서 구리의 분포현황

구리는 지각 중에 55 mg/kg 정도로 분포하고 있으며 황동광(CuFeS_2), 반동광(Cu_5FeS_2), 휘동광(Cu_2S) 등에 존재하고 있다. 토양에서는 2~100 mg/kg, 자연수 중에는 0.2~30 $\mu\text{g/L}$ 존재한다(日本水道協會, 1993). 자연 상태의 물에서 구리는 1~2 $\mu\text{g/L}$ 정도이나, 경도, pH, 음이온 농도, 용존 산소 농도, 온도, 배관 상태에 따라 구리관을 통과하는 물에서 구리가 수 mg/L까지 검출되며 12시간 정제된 먹는물에서는 최고 22 mg/L까지 검출되었다(WHO, 1998). 그리고 구리재질 급탕기에서도 고온으로 가열시 구리의 용출량이 높아진다.

표 1. 전국 정수장 수돗물에서 구리 분포현황
(단위: mg/L)

지역	평균	검출범위	지역	평균	검출범위
서울	0.019	0.009~0.047	강원	0.037	0.001~0.438
부산	0.010	0.007~0.016	충북	0.022	0.008~0.320
대구	0.000	0	충남	0.039	0.008~0.482
인천	0.000	0	전북	0.022	0.005~0.156
광주	0.009	0.009~0.009	전남	0.034	0.001~1.000
대전	0.000	0	경북	0.030	0.006~1.000
울산	0.009	0.009~0.009	경남	0.019	0.008~0.242
경기	0.026	0.008~0.127	제주	0.017	0.017~0.017
평균	0.02	0~1.000			

자료 : 환경부, 2006.

식품 중에서는 송아지 고기, 돼지, 양, 송아지의 간이 10~100 mg/kg의 수준으로 구리를 많이 함유하고 있으며 초코렛, 차, 커피 등도 구리를 10 mg/kg 이상 함유하고 있으며 야채나 곡류에는 평균적으로 1~2 mg/kg의 구리가 함유되어 있다.

2006년 전국 정수장의 수돗물 구리농도를 조사한 자료(<http://www.waternow.go.kr>)를 보면 수돗물의 평균 구리농도는 0.02 mg/L이며, 농도범위는 0.0~1.0 mg/L로 조사되어 대부분 수질기준 1.0 mg/L 이내였다. 반면에 수질환경기준에는 구리에 대한 기준이 설정되어 있기 않기 때문에 우리나라 수계에서 구리 농도분포에 대한 조사결과는 많지 않다. 최근 2007년 경기도보건환경연구원 조사결과에 따르면 한탄강과 금강하류 유역에서 구리의 농도가 5.8~6.1 $\mu\text{g/L}$ 의 범위로 다른 수계보다 다소 높게 나타났으며 수계 전체의 범위는 약 0.3~3.5 $\mu\text{g/L}$ 였다. 일본은 2001년도에 정수 5,523건 중 1건만이 먹는물 수질기준인 1.0 mg/L를 초과하였는데 그 이유는 정수장내 사용빈도가 적은 배관에서 수돗물을 채취하여 배관자체에서 구리가 용출되었기 때문이었던 것으로 수돗물의 원인은 아닌 것으로 조사되었다. 원수에서는 총 5,206건 중 기준치 1.0 mg/L를 초과하는 건은 없었다. 미국은 자연 상태에서 배경농도 수준으로 0.01 mg/L 이하를 보이고 있다. 세계의 주요 하천의 구리 평균 함유량은 0.005 mg/L이다(표 2).

표 2. 세계 주요 자연수중 구리 함유현황(평균치)

구 분	농도 (mg/L)
강수 (하천수/강수)	0.008(6)
해 수	0.003
하 천 수	0.005

자료 : 木村 優, 1980.

2. 구리의 위해성

소화기벽으로 흡수된 원소는 대부분 혈액에 의해 체내 장기 및 조직으로 이동한다. 구리는 장기 및 조직에 비교적 널리 분포하며 모발, 간장, 뇌 및 신장에 많이 함유하고 있다(표 3). 고등 포유동물의 정상 혈액 중에는 0.5~1.5 ppm의 구리가 함유되어 있으며 성인의 혈장 중의 구리 농도는 남자의 평균치가 약 1.0 ppm이며 여자는 남자보다 0.1~0.2 ppm이 높고, 임신 중의 여자는 2~3배 증가한다.

구리는 사람과 동물에게 필수 미네랄원소로 혈액소 형성, 탄수화물 대사, 카테콜아민 합성, 콜라젠, 엘라스틴, 모발 케라틴의 교차결합(Cross-linking), 항산화 방어기전 등에 작용한다(日本厚生労働省, 2003). 또한 조혈, 세포구조 및 중추신경의 구조와 기능에 매우 중요한 효소의 요소이며, 기타 많은 효소에도 구리가 보조인자(Cofactor)로 작용한다. 구리 결핍에 따라 일어나는 증상으로 빈혈은 사람뿐 아니라 동물에게도 나타나는 증상이다. 그러나 과잉섭취 시에는 메스꺼움, 구토, 설사 등 위장관련 질환과 간장 및 신장에 손상이 일어난다.

인체에서 장을 통하여 흡수되는 구리는 25~65%로 평가된다. 성인에게 구리의 흡수율과 정체율은 1일 섭취량에 따라 다르기 때문에 구리부하를 초과할 가능성은 적다. 분유를 먹는 아기의 영양균형연구에서 구리의 흡수율과 정체율은 각각 섭취량의 23.9%와 21.9%였다. 성인의 영양균형 연구에서 성인은 1일 구리섭취량으로 1~5 mg(1일 20~80

μg/kg체중)이 필요하다. 일반적으로 성인의 경우 구리함량은 1~2 mg/kg체중이며, 신생아의 경우 체내 총 구리 함량은 4~5 mg/kg체중으로 이 중 90% 이상이 간에 존재한다. 신생아 간의 구리농도는 성인보다 6~10배 높지만 생후 3개월 동안 감소한다. 일반적으로 혈장의 구리농도는 0.9~1.3 mg/L이다. 이중 5~10%는 알부민에 결합해 있고, 90~95%는 이동성 혈장구리로서 단백질 세룰로플라스민(Ceruloplasmin)과 결합하고 있다. 구리는 간에서 주로 금속티오네인(Metallothionein)과 결합하나 특수기능을 갖는 효소와 결합하기도 한다. 유리상태의 구리이온은 독성효과가 있는데 글루타치온(Glutathione)은 유리상태의 구리이온을 받아들이는 완충역할을 한다. 하루에 구리 1 mg 정도는 세룰로플라스민과 결합하여 조직으로 이동하며 주로 대변으로 배설하며, 1일 섭취량의 0.5~3%만이 소변으로 배설된다(WHO, 1998).

성인은 구리에 체내 항상성의 유전적 장애가 없는 경우에 구리를 1~10 mg/day의 농도로 식품으로 장기간 섭취하여도 유해한 영향은 없다(IOM, 2001; WHO, 2004). 어린이가 장기간 권장 소요량보다 적은 양을 섭취하게 되면 영양실조로 빈혈, 호중구 백혈구 감소, 뼈의 무기질 탈락을 일으키지만(IOM, 2001; WHO, 2004), 성인은 어린이보다 구리 결핍증에 대하여 내성이 있다. 구리를 1~10 mg/day 정도로 섭취하면 Wilson병 환자나 유아기에 구리 간경변증의 일종으로 유전적으로 걸리기 쉬운 유아에게는 유해한 영향이 있을 수 있다(US NRC, 2000; WHO, 2004). 선진국에서 구리의 주요 섭취원은 음식과 물이다. 일반적으로 성인은 구리 섭취량은 1~3 mg/day의 범위이며(IPCS, 1998; IOM, 2001) 비타민/미네랄 보조제의 사용으로 약 2 mg/day로 증가할 것이다. 먹는물은 대부분 상황에서 0.1~1 mg/day을 차지한다(WHO,

표 3. 성인 체중에서 구리의 분포

분 포	혈액	근육	피부	뇌	심장	간장	허파	신장	뼈	모발
농도(mg/kg)	1.0	-	0.8	5	3.5	10	1.3	2.3	0.5	16

자료 : 木村 優, 1980.

2004). 이는 구리를 함유하는 음료수에 의한 소화관으로 영향만을 근거로 한 것이다. 그러나 이 평가는 사람이 24시간 총섭취량을 초과하는 용량을 섭취할 때 일과성으로 나타나는 영향에 따른 것으로 이를 따르는 데는 주의하여야 한다. 3 mg/L 이상의 구리를 함유한 1 L의 물을 1일 몇 회씩 나누어 마시는 것 보다 한번에 마시는 것이 구토 등을 유발하기 쉽다. 구리의 독성은 구리화합물의 종류와 대상동물의 종류에 따라 LD₅₀(반수치사량)값이 다르다(日本厚生労働省, 2003). 염화구리의 경우 기니아피그는 LD₅₀가 15 mg/kg체중이고 rat는 LD₅₀가 65 mg/kg체중이며 황산구리는 250 mg/kg체중(랫드), 20mg/kg체중(마우스, LD₁₀₀)이다. 성인의 경우 투여치사량은 구리(2가)로서 50~500 mg/kg체중이며, 구리를 60 mg/day섭취하면 급성 간 장애를 초래하는 것으로 보고되고 있다(IOM, 2001). 구리(2가)가 30 mg/L이상 함유된 먹는물, 음료를 먹으면 구토, 설사, 멀미를 야기할 수 있다. 단기노출의 경우 14개월 아기의 미세결정성 월슨병에 의한 사망원인은 음식공급용 기구에서 용출된 구리(최고 6.8 mg/L)의 섭취에 의한 것으로 추정되며 신생아가 1일 구리 섭취요구량의 10배인 900 ug/kg체중을 섭취하면 간경변증을 일으킬 수 있다. 1982년 JECFA는 개의 간독성에 대한 NOAEL값인 5 mg/kg체중·day를 근거로 잠정적으로 0.5 mg/kg체중 TDI를 산출하였다(JECFA, 1982).

III. 먹는물에서 구리의 관리현황

1. 먹는물에서 구리 규제현황

각국의 먹는물 기준은 법적인 기준과 권고기준으로 이원화된 경우와 단일 기준으로 정하는 것으로 나누어진다(표 4). 우리나라는 먹는물 기준을 건강유해성 영향과 심미적 영향으로 물질을 구분하여 모두 법적인 기준이며, 구리를 심미적 영향물질로 1 mg/L로 정하고 있다. 일본에서 구리 기준은 우리나라와 같은 1 mg/L이며, 법적인 기준이다. 그러나 영국, 독일, 프랑스는 건강유해성 영향을 미치는 물

표 4. 구리에 대한 국가별 먹는물 수질기준 및 가이드라인

국가	기준농도 (mg/L)	규 제 종 류
한국	1	심미적 기준 (Aesthetic Standard)
일본	1	심미적 기준
미국	MCL/TT action level=1,3	건강기준 (Health Standard)
	1	심미적 권고기준 (Aesthetic Guideline)
WHO	2	건강 권고기준
독일	2	건강기준
캐나다	1	심미적 권고기준
프랑스	2	건강기준 (Health Limit)
	1	심미적 준거기준 (Aesthetic Reference)
영국	2	심미적 기준
호주	2	건강 권고기준
	1	심미적 권고기준

MCL : Maximum contaminant level
 TT : Treatment Technique Requirement, a required process intended to reduce the level of a contaminant in drinking water

질을 법적인 기준으로 정하고 있으며 구리는 건강유해성 측면에서 2 mg/L로 하여 정하고 있다. 프랑스는 심미적인 영향 측면에서는 권고기준으로 1 mg/L를 별도로 정하고 있다. 이외 호주는 권고기준으로 건강유해성 영향과 심미적인 영향으로 구리 기준을 각각 2 mg/L과 1 mg/L를 모두 적용하고 있다. 미국은 공공수계에 적용하는 강제적인 규정(NPDWR)내에 최대허용농도로 1.3 mg/L를 정하고 있고 비강제적인 가이드라인(NSDWR)에 심미적 영향으로 구리를 2 mg/L로 정하고 있다. 따라서 구리 기준을 정하는데 공통적인 것은 건강유해성 영향을 고려하는 경우는 구리를 1.3~2 mg/L이고, 심미적인 영향을 고려할 때는 1 mg/L를 적용하고 있다. 더욱이 우리나라와 일본의 경우 비록 심미적인 영향물질로 1 mg/L를 적용하고 있으나 법적으로 정하고 있기 때문에 외국에 비하여 강화된 기준이라 할 수 있다.

2. 먹는물에서 구리의 섭취권장량

사람은 구리를 주로 식품과 먹는물을 통해서 섭취한다. 네덜란드에서 일인 1일 평균 구리 섭취량은 1.2~1.4 mg인 것으로 조사되었으며, 미국인의 경

우 구리섭취량이 2~4 mg/day이다. 2001년에 미국 국립과학원 산하의학연구소(IOM)은 Copper Gluconate를 투여한 사람의 간 장애를 근거로 산출된 NOAEL값 10 mg/day(Pratt 등, 1985)에 불확실성 계수(UF) 1.0을 적용하여 다음 식에 따라 섭취상한량(UL)을 10 mg/day로 정하였다. 따라서 구리를 과잉 섭취하면 간장애가 일어나므로 성인의 섭취상한량을 10 mg/day으로 정하고, 권장섭취량을 종전의 1.5~3 mg/day에서 0.9 mg/day으로 낮추어 결정하였다((IOM, 2001 ; EC, 2003).

$$UL = \frac{NOAEL}{UF} = \frac{10 \text{ mg/day}}{1.0} = 10 \text{ mg/day}$$

2004년 미국 CDC(Centers for Disease Control and Prevention) 산하 ATSDR(Agency for Toxic Substances & Disease Registry)은 이러한 연구결과를 바탕으로 단위 체중당 값을 0.14 mg/체중kg/day로 산출하여 활용하였다. 또한 유럽연합(2003)은 Pratt 등(1985) 연구결과를 근거로 산출된 NOAEL값 10 mg/day에 불확실성 계수(UF) 2.0을 적용하여 섭취상한량을 5 mg/day로 제시하였다.

$$UL = \frac{NOAEL}{UF} = \frac{10 \text{ mg/day}}{2.0} = 5 \text{ mg/day}$$

각 국가에서의 구리권장섭취량은 표 5와 같이 미국, 캐나다는 성인 10 mg/day이고 우리나라도

2005년에 개정되어 10 mg/day이다. 결과적으로 미국, 유럽 등에서 사람의 간 장애를 근거로 산출된 NOAEL값을 바탕으로 섭취상한량을 각각 10 mg/day 및 5 mg/day로 제시하고 구리의 권장섭취량을 하향 조정하였으나 그것이 현재 각국의 먹는물 기준을 낮추는데 영향으로 작용하지는 않고 있다.

3. 먹는물에서 구리의 기준설정

1) 심미적인 영향에 따른 근거

구리는 물에 함유되어 있으면 욱실의 타일에서 증발하여 구리가 잔류하면 비누와 작용해서 물에 잘 녹지 않아 세면대, 타일, 의류가 청색으로 변화시킨다(日本水道協會, 1993). 일반적으로 용존 구리 맛의 역치는 미네랄워터에서 0.8~1.0 mg/L, 수돗물에서는 2.5 mg/L 이상이면 사람의 50%가 구리 특유의 맛을 느끼는 것으로 보고되고 있다(日本厚生労働省, 2003). 수돗물의 불신 요인인 수돗물의 청수현상은 1 mg/L 이하에서 발생될 수 있다. 일본은 독성이 문제되는 수준의 농도보다 이수 장애의 관점에서의 역치가 낮아 이수 장애에 관한 평가치로서 세탁물 등의 착색을 방지하기 위해서 1 mg/L 이하로 정하였다.

표 5. 각국의 구리 권장섭취량 및 섭취상한량

국 가	연 령	평균필요량 (mg/day)	권장섭취량 (mg/day)	섭취상한량 (mg/day)
WHO	유 아	0.05/kg 체중		
	성 인	0.02/kg 체중		
일본	성 인	2.0		
미국/캐나다 (01년 개정)	1~3세	-	0.34	1
	4~8세	-	0.44	3
	성 인	-	0.90	10
우리나라 (05년 개정)	1~2세	0.23	0.30	2
	3~5세	0.29	0.38	2
	6~8세	0.34	0.44	3
	성 인	0.60	0.80	10

1) 미국 : 식품영양위원회 (The Food and Nutrition Board of the Institute of Medicine)

2) 우리나라 한국영양학회 섭취상한량 10 mg/일은 사람을 대상으로 한 연구에서 간독성을 독성 종말점으로 하여 산정한 NOAEL값에서 산출(UF=1)

2) 건강 유해성 영향에 따른 근거

미국 EPA에서 정하는 먹는물 수질기준은 화학물질의 포괄적인 독성자료를 수집하여 위험성 확인 및 용량-반응평가 과정에 필요한 정보를 제공하는 IRIS(The Integrated Risk Information System)의 자료와 HAs (Health Advisories)의 음용수 중 오염물질에 대한 건강권고치(Life-time Health Advisories)에 따른다. 일반적으로 기준 검토를 위해서 기본 파라미터인 NOAEL, RfD, RSC 자료를 확보하여야 하나 여기서는 구리에 대하여 RfD, RSC 해당 자료가 없으며 발암물질 분류 중 D(인체 발암성으로 분류되지 않음)로 분류하고 있다. IRIS 분류시 비발암성독성물질 즉, C,D,E에 해당하는 물질에 대한 수질기준 설정 절차는 그림 1과 같다.

미국에서 EPA 설립 이전의 구리기준은 1925년에는 0.2 mg/L, 1942년에는 3.0 mg/L, 1962년에는 1.0 mg/L였다. 이후 1970년에 1957년 John Wyllie 사례연구 “Copper Poisoning at a Cocktail Party”에서 산출된 최저영향수준(LOAEL)값 5.3 mg을 근거로 다음 식에 따라 수질기준을 1.3 mg/L로 설정하였다. 여기서 불확실계수는 2로 정하였는데 그 이유는 구리가 인체에 축적되지 않고 배설되며 위장 자극이 일시적인 현상으로 위의 사례 연구에서 5.3 mg이 가장 낮은 값이기 때문이다(Fitzgerald, 1998).

$$\text{수질기준} = \frac{\text{LOAEL}}{\text{불확실계수} \times \text{1일 먹는물섭취량}} = \frac{5.3 \text{ mg}}{2 \times 2 \text{ L}} = 1.3 \text{ mg/L}$$

WHO는 1993년 이후 총 842개 화합물을 발암물질 분류체계를 Group 1(확인된 인체발암물질), Group 2(유력한 인체발암물질), Group 3(인체발암성에 관해 분류될 수 없는 화학물질), 그리고 Group 4(사람에 있어 발암성이 거의 없는 물질)로 분류되나 구리는 여기에 포함되어 있지 않다. 비발암성물질의 권고기준치 설정은 미국 EPA와 유사하나, 참고치(RfD)와 동일한 개념인 일일 섭취허용량(Tolerable Daily Intake; TDI)과 평생건강권고치(Lifetime HAs)와 동일한 권고치(Guideline Value; GV)란 용어로 사용된다. 위해성평가 전반에 필요한 기본 모수인 일일 음용수 섭취량과 기대수명은 미국과 동일하게 각각 2 L/day와 70년이지만 평균체중은 60 kg을 가정한다(WHO, 1993). 또한 3.0 mg/L 이상의 구리가 먹는물에 존재할 때 급성위질환(Gastric Irritation)이 관측되었으며 성인 간장문제, 윌슨병과 관련하여 이들은 일반적으로 먹는물 구리 권고기준에 영향을 주지 않는 것으로 급성독성만이 해당되며, US EPA와는 다른 접근방법이다.

구리의 먹는물 권고기준은 1982년 JECFA는 개의 간독성에 대한 NOAEL값인 5 mg/체중kg/day를 근거로 일일 섭취허용량으로 0.5 mg/체중kg을 산출하였으며 아래와 같이 구리의 권고기준을 2

NOAEL 또는 LOAEL 결정	일반적으로 만성독성모델을 이용하여 부작용이 일어나지 않거나(NOAEL), 부작용이 일어나는 가장 적은 농도(LOAEL)
UF 결정	동물-인체 관계에서 불확실성, 일반사람들보다 민감한 집단 고려
RfD 계산	$RfD = NOAEL \div UF$
DWEL 계산	$DWEL = \frac{RfD \times 70 \text{ kg}}{2 \text{ L/day}}$
Life time HAs (MCLGs 계산)	Lifetime HAs = DWEL × RSC
MCLs 설정	일반적으로 MCLGs=MCLs이나 분석방법등을 고려하여 MCLs 설정

그림 1. 비발암성 독성물질에 대한 먹는물 수질기준 설정절차

mg/L로 설정(1993, 사람에 대한 자료 부족으로 잠정 권고기준)하였다. 2 mg/L의 구리기준은 1972년 개를 대상으로 한 연구를 포함하여 여러 혼동되는 요인으로 의문의 여지가 있다. 개의 연구와 관련하여 WHO에서 언급한 무영향수준(No-effect level)은 실제 가이드라인 계산식에서 사용된 적이 없으나 JECFA에서 정한 추정 인체 일일 섭취허용량을 제공한 것으로 보인다. 한편 일일 허용섭취량 0.5 mg/kg은 구리의 평균 일일섭취량 2~3 mg/day에 해당하는 것으로 제안하였다. 따라서 1998년 WHO는 IPCS에서 먹는물 중 구리농도와 사람의 위장관계 장애 측면에서만만의 상관성을 바탕으로 성인에 대한 경구 섭취상한량을 2~3 mg/day 이상인 것으로 결론을 내리고, 이에 따라 잠정적으로 결정된 과거의 2 mg/L를 그대로 사용하는 것으로 결정(잠정 권고기준)하였다. 그러나 2004년에는 WHO는 구리 중 먹는물 농도와 사람에 대한 위장관계 장애 측면에서의 추가 임상실험 결과를 바탕으로 위장관계 장애를 기준으로 권고기준을 2 mg/L로 유지하면서 “정상적 구리대사를 갖는 성인에 대하여 기준값은 섭취상한량(UL) 10 mg/day를 초과하거나 위장관계에 나쁜 영향을 유발하지 않으면서 매일 2~3 L의 물과 영양보조제의 사용, 식품으로부터의 구리 섭취를 허용하여야 한다”라고 추가 지적하고 있다 (WHO, 2006).

$$\begin{aligned} \text{WHO 권고기준} &= \frac{\text{TDI}(\text{mg/kg/day}) \times \text{체중}(\text{kg})}{\text{일일 먹는물 섭취량}(\text{L/d})} \\ &\quad \times \text{먹는물의 기여도} \\ &= \frac{0.5 \times 60}{2} \times \frac{1}{10} = 1.5 \text{ mg/L} \\ &= 2.0 \text{ mg/L}(\text{반올림}) \end{aligned}$$

유럽연합과 호주는 WHO 기준 선정과 동일하게 적용하고 있으며 체중을 60 kg 대신 70 kg으로 하여 2.0 mg/L로 정하고 있다(Australian government, 2004). 또한 유럽연합 과학자문위원회(Scientific Advisory Committee of the Commission of the European Communities)는 먹는물에서 구리에 대한 독성을 평가한 결과 동물데이터가 불충분

하고 인체 경험상 1~2 mg/L 수준이 허용 가능하여 먹는물 수질기준(Directive)(안)으로 2 mg/L로 유지하는 것으로 결론을 내렸다.

$$\begin{aligned} \text{호주 권고기준} &= \frac{\text{TDI}(\text{mg/kg/d}) \times \text{체중}(\text{kg})}{\text{일일 먹는물 섭취량}(\text{L/d})} \\ &\quad \times \text{먹는물의 기여도} \\ &= \frac{0.5 \times 70}{2} \times \frac{1}{10} \approx 2.0 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

그 외 Sidhu 등(1995)은 미국 1.3 mg/L는 건강 보호와 특히 어린이에게 불충분하다고 보고 1957년 Wyllie 연구에서의 5.3 mg(LAEL)에 불확실 계수 10을 적용하여 체중 70 kg과 일일 먹는물 양을 고려하여 구리의 먹는물 수질기준을 0.3 mg/L로 제안하였으나 현실적으로 수도관망에서 이 기준을 준수하기 어렵고 또한 과학적으로 논란이 있는 Wyllie 결과를 그대로 사용한 점에서 논란의 여지가 있다.

IV. 결론

WHO, 미국 등은 사람에 대한 구리의 급성 독성을 근거로 구리에 대한 먹는물 수질기준을 1.3~2 mg/L로 정하고 있다. 최근에는 미국, 유럽연합 등에서 사람의 간 장애를 근거로 산출된 NOAEL을 바탕으로 섭취상한량을 각각 10 mg/day 및 5 mg/day로 제시하고 있으며, 미국 국립과학원 산하 의학연구소(IOM)에서는 구리의 권장섭취량을 종전의 1.5~3 mg/day에서 0.9 mg/day으로 낮출 것을 권고하고 있다. 따라서 사람에 대한 간 독성에 기초한 구리 NOAEL이 제시되고 구리독성에 따른 권장 섭취량을 낮추는 추세에 있으므로 현행 먹는물 수질기준에 구리를 건강상 유해물질로 고려하여 구리의 권장섭취량을 토대로 먹는물 수질기준을 강화하는 것을 검토할 필요가 대두되고 있다. 최근 연구에서 소화기에 대한 음료수 중의 구리의 영향에 관한 역치가 있는 것으로 나타나고 있으나, 유아나 월슨 병 유전자를 가진 예민한 사람에 대해 장기간의 영향에는 불확실한 부분이 남아 있어 정확한 기준치

를 구하는 데는 현실점에서 어려운 것으로 보인다. 다만, 우리나라는 심미적 영향물질로 건강유해기준인 2 mg/L보다 강화된 1 mg/L를 채택하고 있으며 아직까지 미국, WHO 등에서도 아직까지는 간 독성자료 등을 채택하여 수질기준을 강화하지는 않은 상태이므로 구리의 수질기준값 결정 등 관련 규정의 개정은 선진국의 수질기준 개정 동향을 주시하면서 추후에 추진하는 것이 바람직하다고 판단된다.

약어

NOAEL(No-Observed Adverse Effect Level) : 최대무작용량
 LOAEL(Lowest-Observed Adverse Effect Level) : 최소작용량
 UF(Uncertainty Factor)
 RfD(Reference Dose ; 참고치) : 매일 섭취한다고 가정했을 때 부작용이 없을 정도의 농도로 일반적으로 만성독성 동물모델을 이용하여 결정
 TDI(Tolerable Daily Intake) : 일일 섭취허용량, RfD와 같은 의미로 사용
 DWEL(Drinking Water Equivalent Level) : 먹는물 당량수준, 오염물질이 먹는물을 통해서만 섭취될 경우 다른 부작용이 일어나지 않을 물질의 농도
 Lifetime HA(Health Advisories) : 건강기준치, 먹는물 이외의 다른 노출경로를 고려할 경우 부작용을 일으키지 않을 정도의 물질 농도
 RSC(Relative Source Contribution) : 상대오염원 기여도, 오염물질이 영향을 미칠 수 있는 다양한 노출경로 중에서 물로부터의 섭취 기여율
 JECFA(Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives) : WHO/FAO 합동 식품첨가물 분과위원회

참고문헌

- 경기도보건환경연구원, 2007. 팔당상수원 규제개선 방안에 대한 수질분야 최종추진현황보고서.
 환경부, 2006, 사이버정수장(<http://www.waternow.go.kr>).
 환경부, 2007, 먹는물 수질관리 지침서.
 ATSDR(Agency for Toxic Substances and Disease Registry), 2004, Interaction Profile For Lead, Manganese, Zinc, And Copper. ATSDR, Atlanta, GA.
 Australian Government, National Health and Medical Research Council, and Natural Resource Management Ministerial Council, 2004, Australian Drinking Water Guidelines 6, Australia.
 Commission of European communities, 1996, Opinion of the Scientific Advisory Committee concerning toxicologically acceptable parametric value for copper in drinking water, Scientific advisory committee to examine the toxicity and ecotoxicity of chemical compound. Brussels: European Commission (CSTE/96/6/V).
 EC(European Commission), 5 March 2003, Opinion of the Scientific Committee on Food on the Tolerable Upper Intake Level of Copper, SCF/CS/NUT/UPPLEV/57 Final.
 Fitzgerald, D. J., 1998, Safety guidelines for copper in water, Am. J. Clin. Nutr. 67, 1098S-1102S.
 France, 2006, Qualit de l'eau et de l'assainissement en France, <http://assemblee.nationale.fr>.
 IARC, 2006, <http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification>.
 IOM(Institute of Medicine), 2001, Dietary reference intakes for vitamin A, vitamin

- K, arsenic, boron, chromium, copper, iodine, iron, manganese, molybdenum, nickel, silicon, vanadium and zinc. A report of Panel on Micronutrients, Subcommittees on Upper Reference Levels of Nutrients and of Interpretation and Use of Dietary Reference Intakes, and the Standing Committee on the Scientific Evaluation of Dietary Reference Intakes. Food and Nutrition Board, Institute of Medicine. Washington, DC, National Academy Press.
- IPCS, 1998, Copper, International Programme on Chemical Safety(Environmental Health Criteria) No.200, World Health Organization, Geneva, Switzerland.
- JECFA(Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives), 1982, Toxicological evaluation of certain food additives, World Health Organ Technical Report Series 683.
- Pratt, W. B., Omdahl, J. L., and Sorenson, J. R. J., 1985, Lack of effects of copper gluconate supplementation, American Journal of Clinical Nutrition, 42, 681-682.
- Sidhu, K. S., Nash D. F., and McBride D. E., 1995, Need to revise the national drinking-water regulation for copper. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 22, 95-100.
- US EPA, 2005, National Recommended Water Quality Criteria.
- US EPA, 1988, Drinking water regulations : maximum contaminant level goals and national primary drinking water regulations for lead and copper, Fed. Regist 53, 31516-78.
- US NRC, 2000, Copper in Drinking Water. Washington, DC, National Research Council, National Academy Press.
- WHO, 1998, Guidelines for drinking-water quality, 2nd ed. Addendum to Vol. 2. Health criteria and other supporting information. Geneva, 31-46.
- WHO, 2004, Copper in Drinking Water, Background document for development of WHO Guidelines of Drinking-water Quality, WHO/SDE/WSH/03.04/88.
- WHO, 2006, Guidelines for drinking-water quality, third edition, incorporating first addendum.
- Wyllie, J., 1957, Copper poisoning at a cocktail party. American Journal of Public Health, 47, 617.
- US EPA HA(Health Advisories) 2006, <http://www.epa.gov/waterscience/criteria/drinking>
- US EPA IRIS, 2006, <http://cfpub.epa.gov/iris>.
- 木村 優, 1980, 微量元素의 世界, 裳華房.
- 日本水道協會, 1993, 上水試驗方法 解説編.
- 日本厚生勞動省, 2003, 水質基準値案の根據資料 について, 銅.