

국내 적용가능한 중금속 수서독성에 대한 경도보정 알고리즘 연구

안 윤 주* · 양 창 용 · 남 선 화

(건국대학교 환경과학과)

Hardness Correction Algorithm Applicable to Korea as Related to Aquatic Toxicity Variation for Heavy Metals. An, Youn-Joo*, Chang-Yong Yang and Sun-Hwa Nam (Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea)

Water hardness is a significant parameter as related to aquatic toxicity of some heavy metals. Hardness dependent metals include cadmium, copper, chromium (III), nickel, lead, zinc and silver. Developed countries have applied the hardness correction procedure to derive the water quality criteria for protecting the aquatic organisms. In the present study, we investigated the hardness correction algorithms used in United States of America, European Union, Australia/New Zealand, and Canada, and analyzed the details associated with those algorithms. Toxicity values of heavy metals were definitely different after hardness correction for all of algorithms analyzed. We found that the hardness corrected toxicity values followed by the algorithms of USA and Australia/New Zealand were very similar or same, however they were slightly different for cadmium at the hardness less than 30 mg CaCO₃ L⁻¹. Among the hardness correction algorithms studied, the algorithm used in Australia/New Zealand appears to be a good choice to apply in Korean situation due to its simplicity compared to the algorithm of USA.

Key words : water hardness, hardness correction, aquatic toxicity, heavy metal

서 론

수생태계 내 유해물질의 독성 발현은 수체 내 다양한 물리·화학적 인자들에 의해 영향을 받게 되며 (Meyer, 1999; Riethmuller *et al.*, 2001; Markich *et al.*, 2006), 이러한 인자들에는 경도, pH, 온도, 용존산소, 알칼리도 등이 있다. 특히 경도는 물의 세기를 나타내는 지표로서 수체 내 함유된 Ca²⁺, Mg²⁺, Fe²⁺, Mn²⁺, Sr²⁺ 등 2가 양이온 금속의 함량을 이에 대응하는 CaCO₃ [mg L⁻¹]로 환산하여 표시하게 된다. 경도는 수체 내에 존재하는 주요 중

금속 (예. Cd, Cu, Cr³⁺, Ni, Pb, Ag, Zn 등)이 수용체에 독성 영향을 미칠 경우 수용체 내 흡수기작을 교란시켜 독성 발현의 차이를 유발하기 때문에 (Genderen *et al.*, 2007; 한, 1988) 수서독성평가에서 필수적으로 고려해야 하는 인자이다. 일반적으로 수체 내 존재하는 용존성 중금속이 수용체 내로 침투하였을 때, 경도가 높을수록 Ca²⁺, Mg²⁺ 과 같은 양이온이 증가함에 따라 중금속과 양이온 간 수용체 내로의 흡수 경쟁이 발생하면서 독성이 감소된다. 또한 중금속 이온과 탄산염 (carbonate) 간 결합으로 인해 착물 (complex)이 형성되어 자유 이온 상태의 중금속의 활성이 저하되면서 독성이 감소하게 된다 (Townsend

* Corresponding author: Tel: 02) 2049-6090, Fax: 02) 2201-6295, E-mail: anyjoo@konkuk.ac.kr

et al., 2003; Amor et al., 2004). 경도와 중금속 수서독성 간의 관련성은 *Daphnia magna*와 *Ictalurus punctatus*를 이용한 중금속 수서독성 연구를 통해 확인할 수 있다. *Daphnia magna*를 이용한 Cd, Cu, Zn, Pb의 급성독성실험 연구에 따르면, 경도가 증가함에 따라 독성 발현성이 감소하는 것으로 나타났다(Long et al., 2003; Yim et al., 2006). 또한 Cu에 대해 *Ictalurus punctatus*를 이용한 급성독성실험에서도 경도가 높을수록 생존율이 증가하는 것으로 보고된 바 있다(Perschbacher et al., 1998). 따라서 수체 내 중금속 수서독성 발현성은 경도에 따라 상이하기 때문에 수서독성자료를 경도 보정을 고려하지 않은 채 사용할 경우 그 결과값은 과소평가 또는 과대평가 될 것이다.

미국, 호주/뉴질랜드 등 선진국에서는 경도가 중금속 수서독성의 발현성에 영향을 미친다는 점을 인식하게 되면서, 중금속 수서독성자료 활용 시 경도 보정을 반영하고 있다(ANZECC and ARMCANZ, 2000; S EPA, 2006). 미국에서는 Cd, Cr³⁺, Cu, Pb, Ni, Ag, Zn 등 용존성 금속에 대한 수생태계 보호를 위한 준거치 산정 시 경도 보정 알고리즘을 적용하며(US EPA, 2006), 호주/뉴질랜드에서도 마찬가지로 Cd, Cr³⁺, Cu, Pb, Ni, Zn 등 중금속에 대한 수생태계 보호 권고치 산정 시 경도 보정 알고리즘을 적용하고 있다(ANZECC and ARMCANZ, 2000). 현재까지 국내에서는 2006년 수행된 ‘물환경종합평가방법 개발 조사연구(III)-인체 및 수생태계 위해성 평가체계 구축’ 연구에서 수질유해화학물질에 대한 생태 준거치 산출 과정에서 미국의 경도 보정 알고리즘을 적용한 바 있다(환경부와 국립환경과학원, 2006).

본 연구에서는 미국, 유럽연합, 호주/뉴질랜드, 캐나다 등 선진국에서 수생태계 보호를 위해 사용되는 수서독성자료의 경도 보정 적용 사례를 조사하였으며, 이를 바탕으로 국내 적용 가능한 경도 보정 알고리즘을 제안하였다.

선진국의 경도 보정 알고리즘

1. 미국

미국은 수생태계 보호를 위한 준거치를 산정하기 위해 다양한 수서생물을 대상으로 수행된 화학물질별 급성 및 만성독성자료를 기초로 한다(US EPA, 1980b). 특히 경도 의존 중금속은 수체 내 경도 수준에 따라 독성 영향이 달라지기 때문에 기존 독성 자료를 기준 경도로 보정하여 표준화된 독성 자료를 활용하게 되며, 다음과 같은 수식을 적용하여 경도를 보정하게 된다(US EPA, 1985a, b, 2001).

$$\text{급성독성자료} : Y = \ln W - V(\ln X - \ln Z)$$

$$\text{만성독성자료} : Q = \ln M - L(\ln P - \ln Z)$$

Y (or Q) : 표준화된 독성치

W (or M) : 생물종별 실험 상 독성치의 기하평균

X (or P) : 생물종별 실험 상 경도의 기하평균

V (or L) : 실험 상 경도에 따른 실험 상 독성치의 기울기

Z : 기준 경도 (50 mg CaCO₃ L⁻¹)

한편 수생태계 보호를 위한 국가적 권고치로 활용되고 있는 급성 준거치(Criteria Maximum Concentration, CMC) 및 만성 준거치(Criteria Continuous Concentration, CCC)를 명시하기 위해 Table 1과 같은 경도 보정 알고리즘을 제시하고 있다(US EPA, 2006). 이 때 화학물질별 권고치 목록에 명시된 준거치는 경도 100 mg CaCO₃ L⁻¹를 기준으로 제시된 수치로, 경도 보정 알고리즘을 적용하여 수체 내 경도에 따른 준거치 변동이 가능하다(US EPA, 1999, 2002, 2006). 또한 m_A와 m_C는 생물종별 경도와 독성치의 기울기의 산술평균(pooled slope)

Table 1. Equations and parameters for calculating freshwater dissolved metals criteria that are hardness-dependent in US EPA (2006).

Criteria	CMC (µg L ⁻¹)			CCC (µg L ⁻¹)			
Equations	exp{m _A [ln(hardness)]+b _A } (CF _A)			exp{m _C [ln(hardness)]+b _C } (CF _C)			
Parameters	m _A	b _A	CF _A	m _C	b _C	CF _C	
Cd	1.0166	-3.924	1.136672 - [ln(H)(0.041838)]	0.7409	-4.719	1.101672 - [ln(H)(0.041838)]	
Cr ⁺³	0.8190	3.7256	0.316	0.8190	0.6848	0.860	
Cu	0.9422	-1.700	0.960	0.8545	-1.702	0.960	
Chemical	Pb	1.273	-1.460	1.46203 - [ln(H)(0.145712)]	1.273	-4.705	1.46203 - [ln(H)(0.145712)]
	Ni	0.8460	2.255	0.998	0.8460	0.0584	0.997
	Ag	1.72	-6.59	0.85	-	-	-
	Zn	0.8473	0.884	0.978	0.8473	0.884	0.986

을 가리키며, b_A 와 b_C 는 $\ln(\text{총 중금속의 CMC}) - [\text{pooled slope} \times \ln(50)]$ 에 의해 산출된 절편 (intercept)를 나타낸다(US EPA, 2001). 그리고 CF_A 와 CF_C 는 총 중금속 농도로부터 용존성 중금속 농도를 예측하기 위한 변환 계수이다(US EPA, 2001).

2. 유럽연합

유럽연합은 현재까지 경도에 따른 카드뮴의 수서독성 영향에 관한 연구가 진행되었으며, 미국의 경도 보정 수식을 바탕으로 유럽 회원국 내 경도 수준을 고려하여 무영향관찰농도 (No-Observed Effect Concentration, NOEC) 및 예상무영향농도 (Predicted No Effect Concentrations, PNEC)에 대한 경도를 보정하고 있다(EU, 2007). 먼저 기존 독성 자료의 NOEC에 대한 경도 보정은 다음과 같으며, 미국의 Cd에 대한 생물종별 경도와 만성 독성치의 기울기의 산술평균 (pooled slope)인 0.7409와 기준 경도 50 mg CaCO₃ L⁻¹을 적용하고 있다(EU, 2007)

$$NOEC_{H=50} = NOEC_H \left(\frac{50}{H} \right)^{0.7409}$$

NOEC_{H=50} : 기준 경도 (50 mg CaCO₃ L⁻¹) 일 때 무영향 관찰농도
 NOEC_H : 실험 상 경도일 때 무영향관찰농도
 H : 실험 상 경도

한편 유럽연합은 회원국 내 지역차로 인해 지표수의 경도 차이가 존재한다. 즉, 북유럽국가들 내 지표수의 50%는 경도 10 mg CaCO₃ L⁻¹ 이하로 존재하며, 서유럽국가들 내 지표수의 50%는 경도 200 mg CaCO₃ L⁻¹ 이상으로 존재한다 (Table 2).

따라서 유럽연합에서는 지역적 특이성으로 인해 PNEC_{water, regional} 산정 시 다음과 같은 수식을 통해 경도 보정을 고려하고 있다(EU, 2007).

$$PNEC_{\text{water, regional}} = 0.09 \{H/50\}^{0.7409}$$

PNEC_{water, regional} : 지역별 경도일 때 예상무영향농도
 H : 지역별 경도

3. 호주/뉴질랜드

호주/뉴질랜드는 경도 보정된 준거치를 산출하기 위해 경도 의존 중금속 6종에 대한 다음과 같은 경도 보정 알고리즘을 적용하고 있다 (ANZECC and ARMCANZ, 2000). 이 때 slope factor는 복미 독성 자료의 급성치와

Table 2. Water hardness (as mg CaCO₃ L⁻¹) distribution of surface waters in some EU countries (EU, 2007).

	10 th percentile	25 th percentile	50 th percentile	90 th percentile
Finland	6.5	9	12	25
Sweden	5	8	14	107
Norway	0.7	1.7	4	18
Denmark	14	86	155	272
France	48	83* 217	335	-
Belgium (Flanders)	109	-	240, 500	-
Germany	30	105	210	-

*: 20th percentile

경도 간 관계를 통해 산출되며, 그 수치는 0.82~1.27로 물질에 따라 상이하다 (ANZECC and ARMCANZ, 2000; Markich, 2001).

$$HMTV = TV (H/30)^{\text{slope factor}}$$

HMTV : Hardness Modified Toxicity Value, 경도 보정된 준거치 (µg L⁻¹)
 TV : 기준 경도 (30 mg CaCO₃ L⁻¹) 일 때 준거치 (µg L⁻¹)
 H : 지표수 내 측정 경도
 slope factor : 실험 상 경도에 따른 실험 상 독성치의 기울기 (단, Cd 0.89, Cr³⁺ 0.82, Cu 0.85, Pb 1.27, Ni 0.85, Zn 0.85 임)

한편 호주/뉴질랜드는 지표수 내 측정 경도 범위 (예, soft, moderate, hard, very hard, extremely hard)에 따라 준거치를 구분하고 있으며, 각각의 경도 범위의 중간 농도를 기준으로 준거치를 제시하고 있다. 즉 경도 30 mg CaCO₃ L⁻¹을 기준으로 TV를 제시하며, 경도 90, 150, 210, 400 mg CaCO₃ L⁻¹에 따라 각 물질별 인자 2.5~56.7을 곱하여 경도별 준거치를 Table 3과 같이 제시하고 있다 (ANZECC and ARMCANZ, 2000).

4. 캐나다

캐나다는 수생태계 보호를 위한 준거치를 산정하기 위해 경도 의존 중금속 중 카드뮴에 대해 Table 4와 같은 경도 보정 알고리즘을 적용하여 준거치를 제시하고 있다. 반면 Cu, Pb, Ni의 경우 경도 범위 (예, 0~60, 60~120, 120~180, >180 mg CaCO₃ L⁻¹)에 따라 준거치를 차등 적용하고 있다 (CCME, 2003).

Table 3*. Application factors for soft water trigger values in freshwater of a range of water hardness (mg CaCO₃ L⁻¹) in Australia and New Zealand (ANZECC and ARMCANZ, 2000).

Hardness category by CCREM (1987)	Water hardness (Mid-range value of each water hardness category)	Cd	Cr ³⁺	Cu	Pb	Ni	Zn
Soft (0~59)	30 (default value)	TV	TV	TV	TV	TV	TV
Moderate (60~119)	90	×2.7	×2.5	×2.5	×4.0	×2.5	×2.5
Hard (120~179)	150	×4.2	×3.7	×3.9	×7.6	×3.9	×3.9
Very hard (180~240)	210	×5.7	×4.9	×5.2	×11.8	×5.2	×5.2
Extremely hard (400)	400	×10.0	×8.4	×9.0	×26.7	×9.0	×9.0

*This table is adopted from ANZECC and ARMCANZ (2000)

Table 4. The hardness-related equation and freshwater quality guidelines in Canada (CCME, 2003).

Metals	Hardness-related equation or range of hardness (mg CaCO ₃ L ⁻¹)	Guideline (µg L ⁻¹)
Cd	Water quality guideline = $10^{(0.86[\log(\text{hardness})] - 3.2)}$	0.017
Cu	0~120	2
	120~180	3
	>180	4
Pb	0~60	1
	60~12	2
	120~180	4
	>180	7
Ni	0~60	25
	60~12	65
	120~180	110
	>180	150

선진국의 경도 보정 알고리즘 비교 분석

선진국에서 수생태계 보호를 위해 사용되는 수서독성 자료의 경도 보정 적용 사례를 조사한 결과 미국을 중심으로 유럽연합, 호주/뉴질랜드, 캐나다 등의 국가에서 수서독성자료에 대해 경도 보정 알고리즘을 적용하여 경도 의존 중금속의 독성 영향 변화를 고려하는 것으로 나타났다. 경도 의존 중금속에 대한 경도 보정은 주로 수서독성자료의 독성치와 수서독성자료로부터 도출된 준거치에 대해 경도 보정 알고리즘을 적용하는 방법과 수서독성자료로부터 도출된 준거치를 경도 범위에 따라 차등 제시하는 방법이 있다. 먼저 경도 보정 알고리즘을 적용하는 방법은 중금속별 독성자료의 양질에 따라 수식 내 인자 및 상수가 상이하게 적용되며, 경도 및 독성치 간 상관관

계로부터 수식 내 활용 가능한 일정 상수를 산정하게 된다. 즉 미국의 수서독성자료 중 실험 상 정도와 실험 상 독성치의 관계 그래프에서 물질별 해당 기울기가 수식 내 상수로 활용되며, 이러한 방법은 유럽연합, 호주/뉴질랜드, 캐나다 등의 국가에서도 유사하게 적용된다. 특히 호주/뉴질랜드는 북미 수서독성자료를 바탕으로 일정 상수를 산정하였기 때문에 중금속 6종(예. Cd, Cr³⁺, Cu, Pb, Ni, Zn)에 대한 slope factor는 미국의 m_A, m_C와 거의 동일한 수치를 나타낸다. 또한 보정 시 기준 정도는 국가별 정도 수준에 따라 상이하게 적용되며, 미국 50 mg CaCO₃ L⁻¹, 유럽연합 50 mg CaCO₃ L⁻¹, 호주/뉴질랜드 30 mg CaCO₃ L⁻¹을 기준 정도로 사용하고 있다. 다음으로 정도 범위에 따라 준거치를 차등 제시하는 방법은 주로 캐나다에서 사용되고 있으며, Cd를 제외한 Cu, Pb, Ni에 대한 준거치를 정도 범위에 따라 제시하고 있다.

국내 적용 가능한 경도 보정 알고리즘 제안

이미 미국, 유럽연합, 호주/뉴질랜드, 캐나다 등 주요 국가에서는 경도 의존 중금속의 정도에 의한 독성 영향 변화를 인식하였으며, 이를 고려하기 위해 경도 보정 알고리즘을 개발하여 각각 적용하고 있다. 특히 미국과 호주/뉴질랜드는 수서독성자료를 기반으로 개발된 알고리즘을 적용하여 주요 정도 의존 중금속에 대한 경도 보정을 수행하고 있다.

본 연구에서는 국내 적용 가능한 알고리즘을 제안하기 위해 주요 정도 의존 중금속류에 대한 경도 보정 알고리즘을 제시하고 있는 미국, 호주/뉴질랜드 방식을 비교하였으며, 유럽연합과 캐나다는 오직 카드뮴에 대해서만 알고리즘을 제시하고 있어 제외하였다. 국가별 보정방법을 비교하기 위해서 수서독성평가에서 대표적으로 활용되는

Table 5. Comparison of hardness correction algorithms used in the developed countries.

	USA (US EPA, 2006)		EU (EU, 2007)	Australia/ New Zealand (ANZECC and ARMCANZ, 2000)	Canada (CCME, 2003)
	CMC	CCC			
Cd	$\ln\{1.0166[\ln(H) - 3.924]^* \{1.136672 - [\ln(H) (0.041838)]\}\}$	$\ln\{0.7409[\ln(H) - 4.719]^* \{1.101672 - [\ln(H) (0.041838)]\}\}$	$\text{NOEC}_{H=50} = \text{NOEC}_{H\{50/H\}}^{0.7409}$	HMTV= TV (H/30) ^{0.89}	$10^{(0.86[\log(\text{hardness})] - 3.2)}$
Cr ⁺³	$\ln\{0.8190[\ln(H) + 3.7256]^* 0.316\}$	$\ln\{0.8190[\ln(H) + 0.6848]^* 0.860\}$	—	HMTV= TV (H/30) ^{0.82}	—
Cu	$\ln\{0.9422[\ln(H) - 1.700]^* 0.960\}$	$\ln\{0.8545[\ln(H) - 1.702]^* 0.960\}$	—	HMTV= TV (H/30) ^{0.85}	—
Pb	$\ln\{1.273[\ln(H) - 1.460]^* \{1.46203 - [\ln(H) (0.145712)]\}\}$	$\ln\{1.273[\ln(H) - 4.705]^* \{1.46203 - [\ln(H) (0.145712)]\}\}$	—	HMTV= TV (H/30) ^{1.27}	—
Ni	$\ln\{0.8460[\ln(H) - 2.255]^* 0.998\}$	$\ln\{0.8460[\ln(H) + 0.0584]^* 0.997\}$	—	HMTV= TV (H/30) ^{0.85}	—
Ag	$\ln\{1.72[\ln(H) - 6.59]^* 0.85\}$	—	—	—	—
Zn	$\ln\{0.8473[\ln(H) + 0.884]^* 0.987\}$	$\ln\{0.8473[\ln(H) + 0.884]^* 0.986\}$	—	HMTV= TV (H/30) ^{0.85}	—

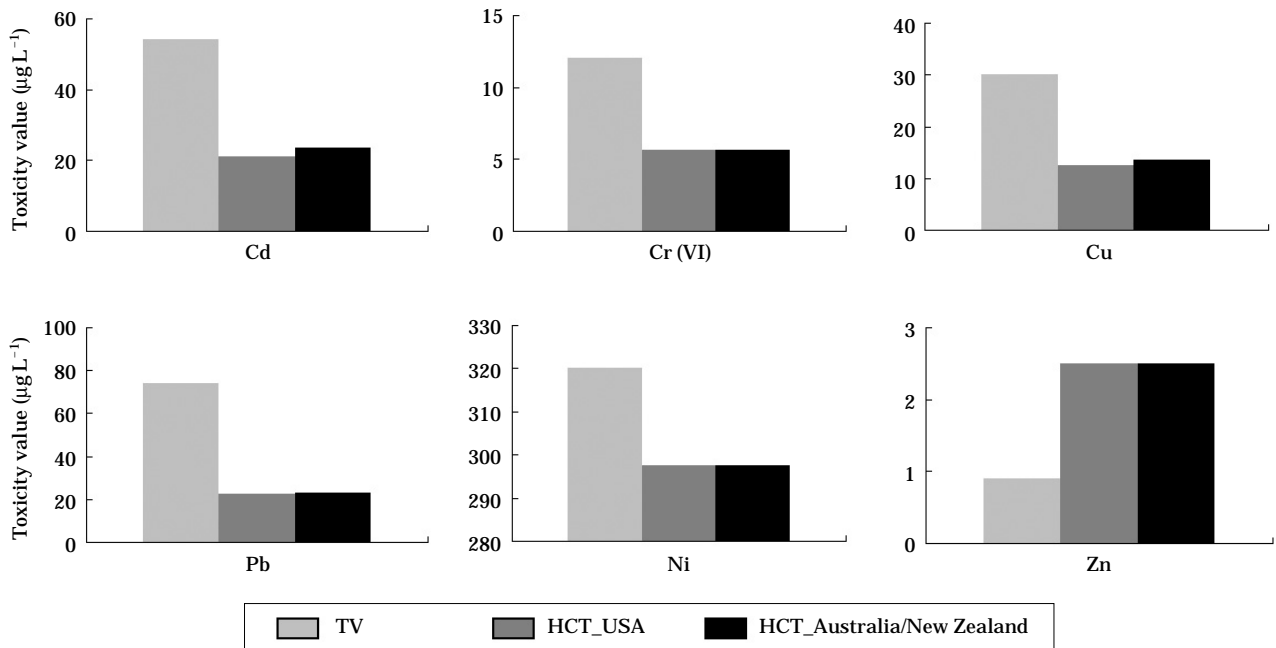


Fig. 1. The toxicity values corrected by algorithms of USA and Australia and New Zealand. TV: Raw toxicity value, HCT_USA: Hardness corrected toxicity value by USA's algorithm, HCT_Australia and New Zealand: Hardness corrected toxicity value by Australia and New Zealand. The HCT presented in the graphs are the toxicity values at the hardness of 100 mg CaCO₃ L⁻¹; TV in graph is based on the raw hardness of 253, 253, 253, 253, 109, and 30 mg CaCO₃ L⁻¹ for Cd, Cr (VI), Cu, Pb, Ni, and Zn, respectively.

*Daphnia magna*에 대한 독성자료 (Kszos *et al.*, 1992; 정 등, 2001; Shaw *et al.*, 2006)를 바탕으로 미국과 호주/뉴

질랜드의 경도 보정 알고리즘을 각각 적용해보았다. 즉 미국과 호주/뉴질랜드의 경도 보정 알고리즘의 기준 경

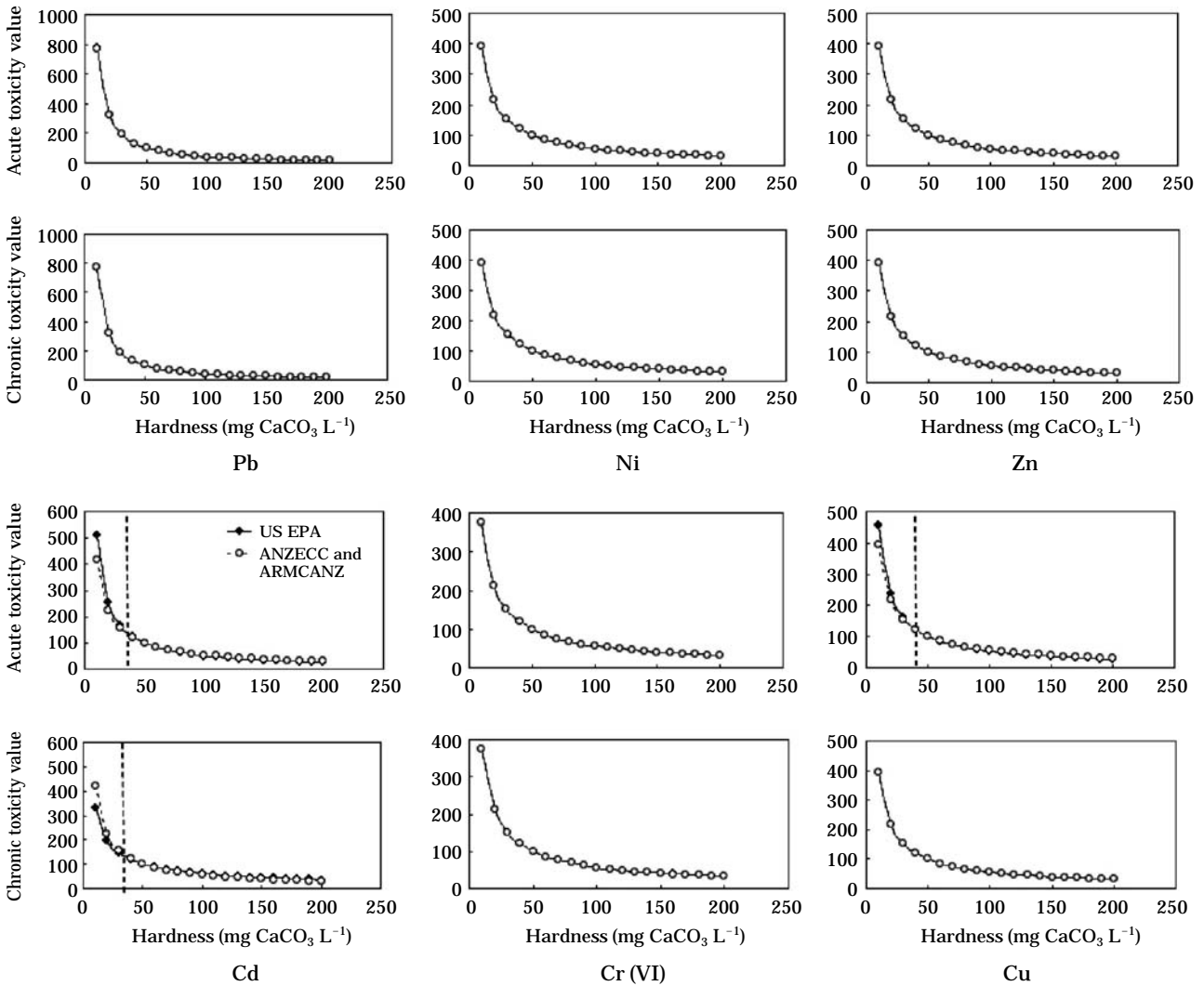


Fig. 2. The hardness corrected toxicity values ($\mu\text{g L}^{-1}$) followed by the algorithms of US EPA and ANZECC/ARMCANZ.

도를 100으로 설정한 후 6개 중금속에 대한 독성치를 각각 보정하였다. 그 결과 경도 보정 전후의 독성치의 차이가 분명하였으며, 경도 보정 후 독성치는 미국과 호주/뉴질랜드의 경우 거의 유사한 수준을 나타냈다(Fig. 1). 따라서 국내 경도 의존 중금속에 대한 수서독성평가에서 미국보다 간단한 알고리즘을 가지고 있는 호주/뉴질랜드의 경도 보정 알고리즘 적용이 용이할 것으로 사료된다.

일정 경도 범위 내(예. $10 \sim 200 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$)에서 미국과 호주/뉴질랜드의 경도 보정 알고리즘을 적용하여 경도 보정을 한 결과 Cd, Cu를 제외한 4개 중금속 그래프에서는 동일한 수준을 나타냈으며, Cd과 Cu의 그래프에서도 $30 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ 이상에서는 유사한 수준을 나타냈다(Fig. 2). 한편 Cu의 경우, pH 6.1~7.8 범위 내에서

민감한 수서생물종에 대해 경도영향이 미미한 수준으로 나타나, 경도 보정의 부적절성이 보고된 바가 있다(Markich *et al.*, 2005).

따라서 본 연구에서는 호주/뉴질랜드의 경도 보정 알고리즘 내 기준 경도 인자를 보완하여 다음과 같은 국내 적용 가능한 경도 보정 알고리즘을 제안하는 바이다.

$$\text{HCTV} = \text{실험 상 독성치} \times (\text{실험 상 경도/기준 경도})^{\text{slope factor}}$$

HCTV : Hardness Corrected Toxicity Value, 경도 보정된 독성치

slope factor : Cd 0.89, Cr^{3+} 0.82, Cu 0.85, Pb 1.27, Ni 0.85, Zn 0.85

한편, 기준 경도는 국가 수질준거치 또는 기준설정에 매우 필요한 기초자료이나, 우리나라의 기준 경도는 아직 신뢰성 있는 자료가 없는 실정이다. 현재 우리나라에서 먹는 물 수질기준으로 수돗물 300 mg CaCO₃ L⁻¹, 먹는 샘물 500 mg CaCO₃ L⁻¹, 먹는 물 공동시설 300 mg CaCO₃ L⁻¹을 제시하고 있을 뿐 국내 수계의 경도를 대표할 수 있는 수치가 제시되어 있지 않다. 따라서 국내 기준경도를 제시하기 위한 추후 경도 모니터링 자료가 필요하며, 이를 토대로 선진국처럼 국가수준의 기준경도를 제시해야 할 것이다.

적 요

본 연구에서는 미국, 유럽연합, 호주/뉴질랜드, 캐나다 등 선진국에서 수생태계 보호를 위해 사용되는 수서독성 자료의 경도 보정 적용 사례를 분석하였으며, 이를 바탕으로 국내 적용 가능한 경도 보정 알고리즘을 제안하였다. 경도 의존 중금속에 대한 경도 보정은 주로 수서독성 자료의 독성치와 수서독성자료로부터 도출된 준거치에 대해 경도 보정 알고리즘을 적용하는 방법이며, 미국, 유럽연합, 호주/뉴질랜드, 캐나다 등 주요 국가에서 적용하고 있다. 또한 수서독성자료로부터 도출된 준거치를 경도 범위에 따라 차등 제시하는 방법이 있으며, 이는 주로 캐나다에서 활용하고 있다. 미국과 호주/뉴질랜드는 수서독성자료를 기반으로 개발된 알고리즘을 적용하여 주요 경도 의존 중금속에 대한 경도를 보정한 결과 경도 보정 전후의 독성치의 차이가 분명하였으며, 미국과 호주/뉴질랜드의 경도 보정 후 독성치는 거의 유사한 수준을 나타냈다. 또한 일정 경도 범위 내에서 미국과 호주/뉴질랜드의 경도 보정 알고리즘을 적용하여 경도 보정을 한 결과 경도 의존 중금속에서는 미국과 호주/뉴질랜드의 방법이 유사 또한 동일한 수준을 나타냈다. 그러나 카드뮴의 경우는 경도 30 mg CaCO₃ L⁻¹ 이하에서 약간 차이가 있었다. 우리나라는 현재 기준경도를 설정하고 있지 않으나, 호주/뉴질랜드의 경도 보정 알고리즘 내 기준경도 인자를 국내 기준경도가 마련되면 국내인자로 보완하여 적용 가능한 경도 보정 알고리즘으로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

인 용 문 헌

정재원, 차미선, 조순자, 이상준. 2001. 물벼룩 (*Daphnia mag-*

na)에 대한 중금속의 급성 및 만성 독성. 한국환경과학회지 **10**: 293-298.

한돈희. 1988. 물의 경도가 흰쥐의 신장, 간에서 중금속 축적에 미치는 영향. 한국환경위생학회지 **2**: 51-64.

환경부와 국립환경과학원. 2006. 물환경종합평가방법 개발 조사연구(III)-인체 및 수생태계 위해성 평가체계 구축.

Amor, M.B., D. Zgolli., M.M. Tlili and A.S. Manzola. 2004. Influence of water hardness, substrate nature and temperature on heterogeneous calcium carbonate nucleation. *Desalination* **166**: 79-84.

Australian and New Zealand Environment and Conservation Council (ANZECC) and Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand (ARMCANZ). 2000. Australian and New Zealand guidelines for fresh and marine water quality.

Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). 2003. Canadian environmental quality guidelines.

Canadian Council of Resource and Environment Ministers (CCREM). 1987. Canadian water quality guidelines. Prepared by the Task Force on water quality guidelines.

EU. 2007. European Union risk assessment report cadmium oxide and cadmium metal part I-Environment.

Genderen, E.V., R. Gensemer., C. Simth., R. Santore and A. Ryan. 2007. Evaluation of the biotic ligand model relative to other site-specific criteria derivation methods for copper in surface waters with elevated hardness. *Aquatic Toxicology* **84**: 279-291.

Kszos, L.A., A.J. Stewar and P.A. Taylor. 1992. An evaluation of nickel toxicity to *Ceriodaphnia dubia* and *Daphnia magna* in a contaminated stream and in laboratory tests. *Environmental Toxicology and Chemistry* **11**: 1001-1012.

Long, K.E., E.J.V. Genderen and S.J. Klaine. 2003. The effects of low hardness and pH on copper toxicity to *Daphnia magna*. *Environmental toxicology and chemistry* **23**: 72-75.

Markich, S.J., P.L. Brown, G.E. Batley, S.C. Apte and J.L. Stauber. 2001. Incorporating metal speciation and bio-availability into water quality guidelines for protecting aquatic ecosystems. *Australasian Journal of Ecotoxicology* **7**: 109-122.

Markich, S.J., G.E. Batley, J.L. Stauber, N.J. Rogers, S.C. Apte, R.V. Hyne, K.C. Bowles, K.L. Wilde and N.M. Creighton. 2005. Hardness corrections for copper are inappropriate for protecting sensitive freshwater biota. *Chemosphere* **60**: 1-8.

Markich, S.J., Angus R.K and S.P. Wilson. 2006. Non-effect of water hardness on the accumulation and toxicity of

- copper in a freshwater macrophyte (*Ceratophyllum demersum*): How useful are hardness-modified copper guidelines for protecting freshwater biota? *Chemosphere* **65**: 1791-1800.
- Meyer, J.S. 1999. A mechanistic explanation for the ln (LC50) vs in (hardness) adjustment equation for metals. *Environmental Science and Technology* **33**: 908-912.
- Perschbacher, P.W. and W.A. Wurts. 1998. Effects of calcium and magnesium hardness on acute copper toxicity to juvenile channel catfish *Ictalurus punctatus*. *Aquaculture* **127**: 275-280.
- Riethmuller, N., S.J. Markich, R.A.V. dam and D. Parry. 2001. Effects of water hardness and alkalinity on the toxicity of uranium to a tropical freshwater hydra (*Hydro viridissima*). *Biomarkers* **6**: 45-51.
- Shaw, J.R., T.D. Dempsey, C.Y. Chen, J.W. Hamilton and C.L. Folt. 2006. Comparative toxicity of cadmium, zinc, and mixtures of cadmium and zinc to daphnids. *Environmental Toxicology and Chemistry* **25**: 182-189.
- Townsend, C.R., L.V.F. Silva and B. Baldissertto. 2003. Growth and survival of *Rhamdia quelen* (Siluriformes, Pimelodidae) larvae exposed to different levels of water hardness. *Aquaculture* **215**: 103-108.
- US EPA. 1980a. Ambient water quality criteria for cadmium.
- US EPA. 1980b. Ambient water quality criteria for lead.
- US EPA. 1985a. Ambient water quality criteria for cadmium-1984.
- US EPA. 1985b. Guidelines for deriving numerical national water quality criteria for the protection of aquatic organisms and their uses.
- US EPA. 1996. Water quality criteria documents for the protection of aquatic life in ambient water.
- US EPA. 2001. 2001 Update of ambient water quality criteria for cadmium.
- US EPA. 1999. National recommended water quality criteria.
- US EPA. 2002. National recommended water quality criteria.
- US EPA. 2006. National recommended water quality criteria.
- Yim, J.H., K.W. Kim and S.D. Kim. 2006. Effect of hardness on acute toxicity of metal mixtures using *Daphnia magna*: prediction of acid mine drainage toxicity. *Journal of hazardous materials* **B138**: 16-21.

(Manuscript received 14 August 2008,
Revision accepted 11 September 2008)