

국내 농업용수의 유해중금속 수질권고기준 도출

안윤주[†] · 백용욱 · 이우미 · 윤춘경

건국대학교 환경과학과

Derivation of Agricultural Water Quality Guidelines for Heavy Metals in Korea

Youn-Joo An[†] · Yong-Wook Baek · Woo-Mi Lee · Chun-Gyeong Yoon

Department of Environmental Science, Konkuk University

(Received 13 March 2008, Accepted 11 June 2008)

Abstract

Korean water quality guidelines for agricultural were derived to protect agricultural water uses according to the Canadian methodology. The adverse effect of heavy metals in agricultural water was of concern due to its persistence, bioaccumulation and ecotoxicity to crop plants. The ecotoxicity data of cadmium, copper, lead, and zinc were collected for the crops grown in Korea, and used to estimate the species maximum acceptable toxicant concentration (SMATC), which corresponds to the water quality guideline. Values of irrigation per year and soil bulk density were revised to reflect the Korean situation. The estimated guideline values for cadmium, copper, lead, and zinc were 0.01, 0.5, 0.1, and 1.0 mg/L, respectively. These values are in agreement with the agricultural water quality guidelines of foreign countries and current Korean water quality standard for the protection of public health. Current water quality standards in agricultural uses were for management of public water resource, and was not prepared to protect crop plants from contaminants. The results of this study will be a basis for the designation of Korean water quality guidelines for the protection of agricultural water uses in the future.

keywords : Agricultural water, Agriculture, Heavy metals, Species Maximum Acceptable Toxicant Concentrations (SMATC), Water quality guideline

1. 서론

국내 수질환경기준은 환경정책기본법에 의거 수역별(하천, 호소), 항목별 기준을 마련하고 있다. '06년 개정된 수질 및 수생태계 환경기준은 사람의 건강보호 17개 항목을 포함하여 하천의 경우 22개, 호소의 경우 25개 항목을 두고 이용목적에 따라 등급(Ia~VI)을 나누어 관리하고 있으며 이중 농업용수는 IV등급에 포함되어 있다. 그러나 현행 농업용수 수질기준은 실질적으로 농작물의 생산성이나 안전성을 고려하여 설정된 기준이 아니기 때문에 농업이 중요한 경제적 기반인 우리나라의 경우 부적합한 용수 이용 시 작물생육 및 생산량에 영향을 주어 큰 경제적 손실이 우려된다(안윤주 등, 2006). 또한 농촌의 도시화 및 생활수준 향상으로 인한 농업지역의 오염원 증가와 작물의 생산성 증대를 위해 과다 투입된 비료 및 농약은 친환경농산물에 대한 관심이 커져가고 있는 시점에서 농작물의 안정성 문제를 야기시킬 수 있다. 국내 수자원의 총 이용량 중 약 47%(2003년 기준)를 차지하는 농업용수는(한국수자원공사, 2007) 이용목적 뿐만 아니라 관리차원에서 적합한 기준 설정이 시급하다.

안윤주 등(2006)은 국내 농업용수 수질기준의 적정성을 평가하고, 농업용수 수질기준에 추가되어야 할 수질항목으로 나트륨, 전기전도도, 미생물항목, 그리고 미량 중금속류를 제안한 바 있다. 이 중 중금속은 지각의 구성원소로 환경 중에 널리 분포하고 있으나 독성을 야기하기 때문에 문제가 된다. 예를 들어 아연이나 구리와 같은 식물생장에 필수적인 중금속, 카드뮴과 같이 식물에 유해한 중금속 등은 일정농도 이상의 중금속에 노출되면 작물의 성장저해를 일으킬 뿐만 아니라 높은 생물축적성(bioaccumulation)으로 인해 농작물에 축적되어 이를 섭취하는 인체에도 악영향을 일으킬 수 있다. 일부국가 및 국제식량농업기구(Food and Agriculture Organization, FAO)에서는 실질적인 작물의 피해사태 연구를 통한 농업용수 수질기준을 제시하고 있다. 특히 캐나다의 경우 자국 농산물 보호를 위한 위해성 기반의 체계적인 방법론에 의해 권고치를 산출하고 있다.

본 연구에서는 농작물에 유해한 영향을 미칠 수 있는 주요 중금속(Cd, Cu, Pb, Zn)에 대하여 국내 농작물을 대상으로 한 위해성기반의(Risk-based) 농업용수 수질권고기준(Guideline)을 도출하였다.

2. 연구방법

2.1. 농업용수 수질권고치 산출론

[†] To whom correspondence should be addressed.
anyjoo@konkuk.ac.kr

농업용수 수질권고치 산출방식은 “Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Agricultural Water Use” (CCME, 2003)를 수정하여 적용하였다. 캐나다의 산출방식은 독성자료의 양과 질에 따른 체계적 방식에 따라 기준산출이 가능하다. 따라서 전반적인 산출방식은 캐나다의 권고치 산출방식을 따르되 국내화가 가능한 인자는 국내인자를 적용하여 국내실정을 고려하였다. 권고치는 독성자료의 충족요건에 따라 정식 권고치(Full Guideline)와 임시 권고치(Interim Guideline)로 나뉜다. 정식 권고치의 경우 곡류, 건초, 목초 등에 대한 3개 이상 종의 최소 3개 연구가 필요하며 그 외 농작물의 경우 5개 이상의 종에 대한 최소 3개의 연구가 필요하다. 임시준거치의 경우 곡류, 건초, 목초 등에 대한 2개 이상 종의 최소 2개의 연구가 필요하며 그 외 농작물의 경우 2개 이상 종에 대한 최소 2개 연구 자료로부터 준거치를 산출한다(Fig. 1).

2.1.1. 농작물 독성자료 수집 및 분류

자료수집은 미국 환경보호청(US EPA)에서 제공하는 ECOTOX DB와 SCI(E)급의 식물독성 연구논문 및 국내외 관련 연구보고서(CANTOX Environmental INC, 2001; US DOE, 1997)를 활용하였다. 수집된 독성자료는 권고치 설정을 위해 다음과 같은 기준을 두어 분류하였다. 1) 급·만성구분을 위한 노출기간에 따라 분류하였다. 2) 독성종말점이 NOEC(No-Observed-Effect-Concentration)이 아닌 EC50(Median Effect Concentration) 또는 LC50(Lethal Effect Concentration)로 제시된 경우 “Australian and New Zealand Guidelines for Fresh and Marine Water Quality” (ANZECC & ARMCANZ, 2000)에서 제시하고 있는 전환식을 이용하여 NOEC으로 환산하였다(식 (1)).

$$NOEC = \frac{E(L)50}{5} \tag{1}$$

2.1.2. 도출방법

CCME(2003)의 도출방식은 가용한 독성자료에 따라 2가지로 나뉜다.

- 1) 독성값의 단위가 용수 내 오염물질농도(mg/L)로 보고된 경우

오염물질에 노출시킨 농작물의 독성연구 결과가 용수 내 오염물질농도(mg/L)로 보고된 경우에 식 (2)를 이용하여 도출할 수 있다. 종 최대 허용독성농도(Species Maximum Acceptable Toxicant Concentrations, SMATC)는 종(Species)별 독성 자료의 LOEC와 NOEC의 기하평균을 산출한 후, 불확실성계수(Uncertainty factor, UF)로 나누어줌으로서 산정할 수 있다. 이때 불확실성 계수는 10으로 고정된 값을 적용한다.

$$SMATC = \frac{(LOEC \times NOEC)^{0.5}}{UF} \tag{2}$$

SMATC = Species Maximum Acceptable Toxicant Concentrations (μg/L)
 LOEC = Lowest-Observed-Effect Concentration (μg/L)
 NOEC = No-Observed-Effect Concentration (μg/L)
 UF = Uncertainty factor (unitless)

- 2) 독성값의 단위가 토양농도(mg/kg)로 보고된 경우

본 방법론은 독성종말점이 용수 내 오염물질농도(mg/L)로 보고되지 않고, 토양 부피(kg)당 오염물질의 농도(mg)로 보고된 증급속을 대상으로 할 때 적용하며, 식 (3, 4, 5)를 이용한 3단계의 전환 과정을 통해 산출된다. 1단계로 농작물에 대한 허용 가능한 토양농도(Acceptable Soil Concentrations, ASCs; 생장기 동안 농작물에 영향을 미치지 않는 토양농도)를 산정한다. ASC는 독성자료의 LOEC과 NOEC의 기하평균을 불확실성계수로 나누어줌으로서 산출할 수 있다(식 (3)). 2단계인 최대 허용 오염물질량(Maximum Allowable Contaminant Mass, MACM)의 도출은 식 (3)에서 산출된 ASC에 관개토양의 평균 밀도 및 깊이를 적용해서 계산할 수 있다(식 (4)). 마지막 3단계에서는 MACM을 관개율(Irrigation Rate, IR)로 나누어줌으로서 SMATC를 도출할 수 있다(식 (5)). 도출된 SMATCs중 가장 민감한 작물의 SMATC를 수질 권고기준으로 채택한다. 한편 산출식 중 적용 가능한 국내 인자가 있는 경우 이를 이용하여 국내 실정을 고려하였다. 국내 연간 관개율(IR)은 ‘논 관개용수량 산정을 위한 실용적 연구’(이용직, 2005)에서 보고된 이동지구의 관개면적(2,063 ha) 및 물 사용량

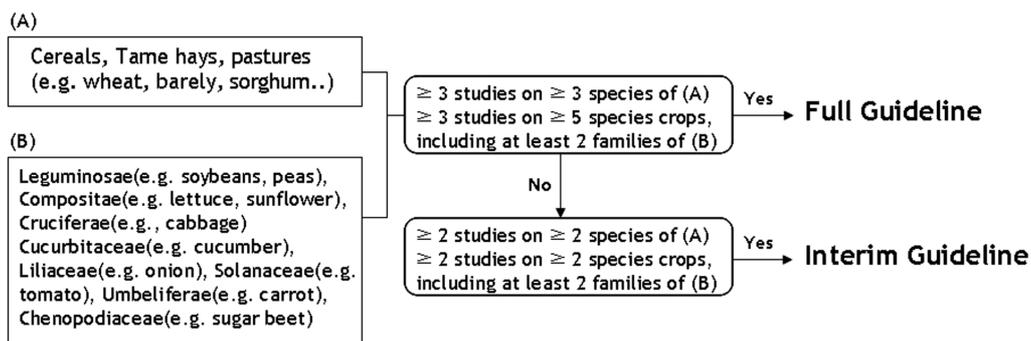


Fig. 1. Minimum toxicological data set requirements for guideline derivation.

(17.9 m³/year)을 토대로, 면적당 적용률(8.34×10⁷ L/ha/year)을 산정하여 이용하였다. 관개토양의 평균용적밀도(SBD)는 ‘토양오염기준과 연계한 위해성평가 실무지침작성 연구’(환경부, 2006)에서 보고된 국내 평균값인 1,600 kg/m을 적용하였다. 관개토양의 깊이(LD)는 토양내 잔존하는 미량이온을 고려해 주기 위함으로써 본 연구에서는 캐나다와 같은 0.15 m를 이용하였다.

$$ASC = \frac{(LOEC \times NOEC)^{0.5}}{UF} \quad (3)$$

$$MACM = ASC \times SBD \times (100m \times 100m \times LD) \quad (4)$$

$$SMATC = \frac{MACM}{IR} \times 10^3 \quad (5)$$

- ASC = Acceptable Application Rate (mg/kg soil)
- LOEC = Lowest-Observed-Effect Concentration (mg/kg soil)
- NOEC = No-Observed-Effect Concentration (mg/kg soil)
- UF = Uncertainty Factor (default=10, unitless)
- MACM = Maximum Allowable Contaminant Mass (mg)
- SBD = Soil Bulk Density (default = 1600 kg/m³)
- LD = Leaching Depth in Soil (default = 0.15 m)
- IR = Irrigation Rate per Year (L/ha/year)

3. 결과 및 고찰

3.1. 농업용수 수질 권고치 도출

수집된 농작물 독성자료는 독성값의 단위가 토양농도(mg/kg)로 보고된 자료들이었다. 구리의 경우 정식 권고치 산출이 가능하였으며 카드뮴, 납, 아연의 경우 임시권고치 산출이 가능하였다. 카드뮴은 6개 종(Species)에 대한 총 42개의 독성자료가 수집되었으며 이중 가장 민감한 값을 나타낸 *Triticum aestivum*의 ASC는 0.31 mg/kg soil이다. 구리의 경우 8종의 농작물에 대한 38개의 독성자료가 수집되었으며 이중 최저 ASC는 *Avena sativa*의 19.43 mg/kg soil이었다. 납과 아연은 각각 5종에 대한 28개, 31개의 독성자료가 수집되었으며 최저 ASC는 각각 1.96 mg/kg soil (*Allium cepa*), 24.92 mg/kg soil(*Hordeum vulgare*)이었다.

각 중금속에 대한 최저 ASC를 이용하여 농업용수 권고

치를 도출한 결과 카드뮴, 구리, 납, 그리고 아연의 권고기준이 각각 0.01, 0.5, 0.1, 그리고 1.0 mg/L로 산정되었다 (Table 1).

3.2. 국내 농업용수 유해중금속 권고기준 타당성 검토

본 연구에서 도출된 4종 중금속의 농업용수 권고치에 대하여 국내·외 기준 및 독성문제와 관련하여 타당성 여부를 평가하였다. 한국농촌공사의 ‘안전농산물(벼) 생산에 적합한 농업용수 수질기준 정립 연구’에서는 카드뮴, 구리, 납, 아연의 최대허용농도를 각각 0.02, 0.01, 검출 안됨, 0.31 mg/L으로 제안하고 있다. 이 수치는 벼를 대상으로 한 관개용수의 권고치로서 본 연구에서 제안하고 있는 권고치보다 낮은 수치이다. 본 연구에서는 곡류 및 채소류를 포함한 전반적인 농작물을 대상으로 하여 권고치를 도출하였으며 따라서 벼를 대상으로 하여 도출된 기준과는 작물의 종 민감도(Species Sensitivity)에 있어서 차이가 나타날 수 있다.

카드뮴에 대한 국외 농업용수 수질기준은 캐나다와 중국에서 각각 0.005 mg/L, FAO와 일본에서는 0.01 mg/L로 설정하고 있으며 본 연구에서 도출된 값인 0.01 mg/L는 FAO와 일본기준과 같다. 한편 성장액 내 0.1 mg/L의 카드뮴이 콩, 근대, 순무 등에 독성을 야기할 수 있다는 연구결과(농어촌진흥공사, 1997)가 있으며 Codex Alimentarius Commission(CAC)에서 제시하고 있는 농작물 내 카드뮴의 최대 허용농도는 0.05~0.2 mg/L이다(식품의약품안전청, 2006). 따라서 본 연구에서 제안된 0.01 mg/L는 적절하다고 사료된다. 그러나 FAO에서는 걱정 관개수준(10,000 m³/ha/yr)을 고려하여 0.01 mg/L를 책정하고 있다. 만일 대상지역의 관개수준이 FAO에서 책정한 적정 관개수준을 초과한다면 권고치는 낮아질 수 있으므로 카드뮴에 대한 권고기준은 지역적인 차이성을 고려하여야 한다.

구리는 각 국가별로 0.01 mg/L에서 1.0 mg/L까지 다양한 기준안을 나타내고 있고, 현행 국내 법규상에서는 0.5 mg/L로 제안되어 있다. 본 연구에서 도출된 권고치는 0.5 mg/L로 캐나다와 중국의 기준에 비해 낮은 수치이다. 기존 수행된 구리의 성장저해실험에서(An, 2005; Xu et al., 2006)는 0.1~1.0 mg/L의 범위에서 식물에게 영향을 야기하는 요인으로 작용할 수 있고, 납에 비해 작물에 대한 독성 영향이 높은 것으로 알려져 있다고 보고하고 있다. 본 연구의 0.5 mg/L 권고치는 국외의 기준 범위 내에 포함되어

Table 1. Proposed guidelines of agricultural water quality for heavy metals in Korea, water quality standard for public health protection in Korea, and agricultural water quality values of foreign countries (Unit : mg/L)

Guideline	SMATCs	Korea ¹⁾	FAO ²⁾	Canada ³⁾	Japan ⁴⁾	China ⁴⁾
Cd Interim guideline	0.01	0.005	0.01	0.0051	0.01	0.005
Cu Full guideline	0.5	0.5	0.2	0.2~1.0	0.02	1.0
Pb Interim guideline	0.1	0.05	5.0	0.2	0.01	0.1
Zn Interim guideline	1.0	-	2.0	1.0~5.0	0.5	2.0

1) Korea water quality standard for public health protection
 2) FAO (1994)
 3) CCME (2003)
 4) Korean rural community & Agriculture corporation (1997)

있어 적절하다고 판단된다.

납은 0.01 mg/L(일본)부터 5.0 mg/L(FAO)까지 기준범위의 폭이 넓었다. 본 연구에서 도출된 결과는 0.1 mg/L로 중국기준(0.1 mg/L)과 같으며 FAO의 권고기준 내에 포함된다. 납에 대한 기존 연구에 의하면 납을 직·간접적으로 1.0 mg/L 이상을 섭취할 경우 체내에 축적되는 것으로 알려져 있으며(농어촌진흥공사, 1997), CAC에서 발표된 자료 내에 채소를 포함한 농작물 내 납의 최대 허용농도를 0.1 mg/L(식품의약품안전청, 2006)로 규정하고 있으므로 본 연구에서 제안된 수치는 적절하다고 판단된다.

아연의 경우 캐나다는 1.0~5.0 mg/L까지 매우 폭 넓은 기준안을 보유하고 있다. FAO와 중국에서는 2.0 mg/L로 책정되어있고, 일본의 경우 0.5 mg/L의 기준을 보유하고 있다. 아연에 대한 작물 생장의 연구는 Dong 등(2006)의 연구에서 600 mg/L 수준의 아연농도는 벼의 전체적인 생장을 억제하고, 그 이하의 농도에서는 식물 호르몬에 영향을 야기하여 부분적인 성장저해가 나타난다고 보고되고 있다. 수도작에서는 아연의 함량이 증가할수록 청고현상(전분, 당, 유기산의 급격한 소모로 인해 청색을 띠며 괴사하는 현상)이 나타나고, 새로운 잎의 백화현상이 발생하게 된다(농림부, 2004). 그러나 이러한 현상은 아연의 농도가 32 mg/L 이상에서 발생하는 것으로, 본 연구에서 도출된 1.0 mg/L는 작물 생장에 문제가 없다고 판단된다. 또한 국내 작물 재배가 수도작 중심임을 고려하여 아시아 지역(중국, 일본)의 기준과 비교시 두 국가의 기준안에 포함되는 수치이므로 타당성이 있다고 판단된다.

4. 결론

현행 수질환경기준 중 4등급에 포함되어있는 국내 농업용수의 수질기준은 관리 목적의 수질기준이다. 이러한 현행 관리기준은 농업용수가 근본적으로 고려하여야 할 농작물 재배목적에 적절하지 않으며, 과학적 근거 역시 불충분하다. 또한 일부항목은 필요 이상으로 엄격하게 설정되어 있어 농업의 수자원 관리 및 이용에 비효율적이다. 따라서 농업용수의 이수목적에 적합한 수질기준 설정이 필요하며, 그 방안은 과학적인 연구를 통해 진행되어야 한다. 본 연구에서는 농작물 위해성에 근거한 농업용수 권고치 도출을 위하여 캐나다 CCME의 산출방식에 따라 권고치를 산출하고 국내화가 가능한 인자의 경우 국내인자를 적용하여 국내 실정을 고려한 농업용수 수질 권고치를 제안하였다. 또한 국내·외 농업용수 수질기준 및 독성영향과 관련하여 제안한 수질 권고치의 타당성을 평가하였다. 그 결과 제안한 농업용수 수질권고치는 국외에서 제안하고 있는 기준범위 내에 포함되며 독성문제가 있어서도 타당한 것으로 나타났다.

본 연구는 위해성기반의 농업용수 수질기준 설정을 위한 초기단계로써, 이를 바탕으로 체계적인 심화연구가 진행되기 위한 몇 가지 사항을 제안하고자 한다. (1) 국내에서 생산·유통되는 주요 농작물에 대한 통계자료가 필요하다. 이는 국내 재배종의 독성평가를 위한 기초 자료로 활용될

수 있으며, 이를 바탕으로 (2) 국내 주요 재배종에 대한 유해 중금속 독성평가가 수행되어야 한다. 마지막으로 (3) 국내 재배환경 고려를 위한 인자에 대한 연구가 진행되어야 한다. 대표적인 농업 오염물질인 농약류, 중금속류는 그 독성 영향이 관개토양의 평균용적밀도, 평균용적부피, 관개량과 밀접한 관계가 있으며 이러한 인자는 국외에서 제안된 수치를 적용할 경우 우리나라 실정에 적합하지 않을 것이다. 국내 농업용수 수질기준이 농작물을 보호하고, 나아가 주요 섭취자인 인체 건강을 고려하는 실질적인 목적의 기준이 되기 위해서는 인체 및 생태위해성 기반의 기준이 점차적으로 마련되어야 할 것이다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 농업특정연구사업(과제번호: 20060201033006) “농업용수의 수질오염 방지기술 개발”의 지원으로 수행되었음

참고문헌

- 농림부(2004). 농업용수 수질오염이 벼생육에 미치는 영향연구. 농어촌진흥공사(1997). 농업용수 수질기준 제정 등 제도개선에 관한 연구.
- 식품의약품안전청(2006). 농산물 등 중금속 실태조사.
- 안윤주, 이우미, 윤춘경(2006). 국내 농업용수 수질기준의 적정성 평가 및 추가수질항목 제안. *한국유수학회지*, **39**(3), pp. 285-295.
- 이용직(2005). 논 관개용수량 산정을 위한 실용적 연구. 박사학위논문, 건국대학교.
- 한국수자원공사(2007). 제 15회 세계 물의 날 자료. 물과 미래.
- 환경부(2006). 토양오염기준과 연계한 위해성평가 실무지침 작성 연구.
- An, Y. J. (2005). Assessment of comparative toxicities of lead and copper using plant assay. *Chemosphere*, **62**(8), pp. 1359-1365.
- ANZECC & ARMACNZ (2000). *Australian and New Zealand Guidelines for Fresh and Marine Water Quality*.
- Cantox Environmental INC. (2001). *Ecotoxicological Profiles, Ecological Risk Assessment Program*.
- CCME (2003). *Canadian Environmental Quality Guidelines for the Protection of Agricultural Water Uses*.
- Dong, Y., Ogawa, T., Lin, D., Koh, H. J., Kamiunten, H., Matsuo, M., and Cheng, S. (2006). Molecular mapping of quantitative trait loci for zinc toxicity tolerance in rice seedling (*Oryza sativa* L.). *Field Crops Research*, **95**(2-3), pp. 420-425.
- FAO (1994). *Water Quality for agriculture*.
- US DOE (1997). *Toxicological Benchmarks for Screening Contaminants of Potential Concern for Effects on Terrestrial Plants: 1997 revision*.
- Xu, J., Yang, L., Wang, Z., Dong, G., Huang, J., and Wang, Y. (2006). Toxicity of copper on rice growth and accumulation of copper in rice grain in copper contamination soil. *Chemosphere*, **62**(4), pp. 602-607.