

토양에서 상추의 생장에 대한 Tetracycline의 독성에 미치는 구리 (II)의 효과 Effects of Copper (II) Treatment in Soil on Tetracycline Toxicity to Growth of Lettuce (*Lactuca sativa* L.)

이병주 · 민현기 · 김민석 · 김정규*

고려대학교 환경생태공학과

Byeongjoo Lee, Hyungi Min, Hyungi Min, Min-Suk Kim and Jeong-Gyu Kim*

Department of Environmental Science and Ecological Engineering, Graduate School, Korea University, Seoul 02841, Korea

Received 28 March 2017, revised 30 March 2017, accepted 30 March 2017, published online 31 March 2017

ABSTRACT: Tetracycline (TC) groups, widely used veterinary antibiotics, can enter into environment through animal manure application. TC forms a ligand complex with multivalent metal cations via chelation that can affect sorption and mobility of TC in soil. So far, however, it has been confirmed through the reaction of the soil outside in the aqueous solution and the evaluation of the performance in the soil cultivation process is insufficient. The purpose of this study was to examine effects of copper on TC toxicity to lettuce growth. In this research, 750 mg kg⁻¹ of TC and 2.5, 7.5, 17.5 mg kg⁻¹ of Cu are treated in soil and lettuce was cultivated in the treated soil. Growth difference of lettuce by treatment was observed. As a result, 750 mg kg⁻¹ of TC treated soil showed toxic effect to lettuce and the effect is alleviated by copper treatment.

KEYWORDS: Antibiotic, Copper, Lettuce, Tetracycline

요 약: 가축용 항생제로 널리 사용되는 Tetracycline (TC)군은 주로 가축 분뇨를 통하여 환경에 퍼지게 된다. TC는 환경 내에서 중금속 양이온과의 리간드 결합을 통해 토양으로의 흡착량과 그 이동성이 변화되리라 예측된다. 그러나 지금까지 수용액 내에서 토양 외 반응을 통해 확인되었고 토양 내에서 식물에 대한 영향 평가는 미비한 실정이다. 본 연구의 목적은 토양 내 구리가 TC와 반응하여 TC에 의한 식물 독성에 미치는 영향을 확인하는데 있다. 본 실험은 토양에 750 mg kg⁻¹의 TC와 각각 0, 2.5, 7.5, 17.5 mg kg⁻¹의 CuSO₄를 처리한 후, 처리된 토양에 상추를 재배하여 처리 농도에 따른 상추의 성장 정도를 비교하였다. 실험 결과 상추에 유의한 독성이 나타나는 것으로 확인된 750 mg kg⁻¹의 TC가 처리된 토양에서 구리의 처리가 상추에 발현되었던 독성을 저감시키는 것을 확인하였다.

핵심어: 항생제, 구리, 상추, 테트라사이클린

1. 서 론

Tetracycline (TC) 군의 항생제는 축산업에서 질병 예방, 생산량 증대 및 성장 촉진을 목적으로 널리 사용되고 있다 (Blackwell et al. 2007). 가축에게 투여된 항생제는 몸 안에서 완전히 대사되지 않고 투여량의

10~90%가 모분자 (parent compound) 형태로 분뇨를 통하여 배출된다 (Halling-Sørensen 2000, Jjemba 2002, Kulshrestha et al. 2004). 가축분으로 배출된 항생제는 직접 또는 가축분 퇴비의 형태로 토양 환경에 유입되어 (Jechalke et al. 2014), 항생제 저항성을 가진 미생물을 증가시키거나 작물 생장에 부정적인 영향을 줄

*Corresponding author: lemonkim@korea.ac.kr, ORCID 0000-0002-5734-1311

© Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. 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.

수 있다 (Boonsaner and Hawker 2013). Song과 Guo (2014)는 항생제의 작물 축적에 따른 인체 전이 가능성을 보고하기도 하였다. 토양 내에서 TC는 양이온 교환, 전기적 이끌림, 표면 결합 등의 기작으로 토양 입자에 흡착된다 (Tolls 2001). 또한 TC는 다양한 작용기를 가지고 있어 환경 pH에 따라서 극성이 다른 다양한 화학종으로 존재할 수 있다 (Sarmah et al. 2006). 이러한 특징 때문에 pH는 토양 내에서 TC의 흡착량을 결정하는 중요한 인자다. 이 외에도 토양 양이온 교환능 (cation exchange capacity, CEC), 유기물 함량, 온도 등이 토양에 대한 TC 흡착량에 영향을 주는 것으로 알려져 있다 (Jones et al. 2005, Sassman and Le, 2005, Figueroa et al. 2010).

TC는 여러 개의 O- 와 N-작용기를 가지고 있으며 이들이 전자공여체 (electron donor)로 작용해 다양한 금속과 결합할 수 있다 (Albert and Rees 1956). 이와 관련한 선행 연구에서는 의약품으로서 혈액이나 체액에 존재하고 있는 마그네슘, 나트륨, 칼슘, 칼륨 등을 대상으로 약물동력학적으로 접근한 것이 주를 이루었다 (Bahrami et al. 2012). 반면 토양환경에서 TC는 앞서 언급된 양이온 뿐 아니라 중금속 양이온들과 함께 존재한다. 토양 내 다가양이온 중금속은 음전하를 띠고 있는 토양 표면과 TC의 음전하 부분 사이에서 다리역할을 하며 흡착을 돕는다. [토양-양이온-TC]의 3단 결합이 토양수 내의 양이온-TC 결합보다 안정할 경우 TC의 흡착량은 더 증가된다 (Zhao et al. 2013). 토양 내 흡착량이 변화되면 TC의 환경 내 거동, 가용성, 분해 등도 변화하기 때문에 다가 중금속에 의한 다리역할은 TC의 식물에 대한 영향에 중요한 역할을 한다 (Carter et al. 2014).

이런 이유로 TC의 토양 내 거동에 영향을 미치는 중금속과 TC의 상호반응에 대한 보고가 있었다 (Thiele-Bruhn 2003, Li et al. 2010, Zhao et al. 2011b). 토양 광물을 대상으로 금속이온의 존재가 TC 흡착량의 변화를 확인한 연구들이 여럿 있었으며, 특히 구리의 경우 TC의 흡착량이 증가하는 것으로 보고된 바 있다 (Wang et al. 2008, Zhao et al. 2011a). 하지만 이들 연구는 구리에 의한 TC 흡착량 변화를 수용액 상에서 확인한 것이며, 토양 내에서 확인한 연구는 희소하다.

본 연구의 목표는 (1) 토양 내에서 TC의 식물 독성을 확인하고, (2) 토양 중에서의 구리에 의한 TC의 흡착량

변화가 식물독성에 미치는 영향을 확인하는 데에 있다.

2. 재료 및 방법

2.1 대상 토양의 선정과 처리

본 실험에 사용된 토양은 충청북도 단양군 적성면 하원곡리에서 채취하였다. 채취한 토양은 풍건한 후 2 mm 체로 걸러서 실험에 사용하였다. 채취된 토양은 TC와 Cu 그리고 두 물질을 혼합한 처리구로 나누었다. TC 처리구는 Tetracycline (Sigma-Aldrich)을 100 g의 토양에 각각 0, 10, 50, 100, 300, 500, 750 mg kg⁻¹의 수준으로 5 mL의 증류수에 녹여 첨가한 후 20 분간 혼합하여 스파이킹하였다 (Boxall et al. 2006, Liu et al. 2009).

토양의 구리는 CuSO₄의 상태로 처리하였으며 농도는 각각 0, 2.5, 7.5, 17.5 mg kg⁻¹ (Cu-0, Cu-1, Cu-2, Cu-3)의 수준으로 처리되었다. 토양에 대한 구리의 처리는 Daoust et al. (2006)의 방법을 일부 수정하여 진행하였다. 2 mm로 채진 토양 200 g을 CuSO₄용액에 1:1.5의 비율 (w/v)로 500 mL Nalgene bottle에 넣고 24시간 동안 교반기를 이용하여 교반하였다. 후에 72 시간 동안 구리 흡착이 일어날 수 있도록 정치시켜놓았다. 구리 첨가 과정 끝에 토양 용액은 원심분리기 (Avanti J-E, Beckman, CA, USA)를 이용하여 30 분간 5000×g의 조건에서 원심분리한 후 상층액을 제거하였다. 토양 pH는 이후에 다시 조정해주었다. 남은 토양 혼합물은 오븐에서 60°C로 건조시켜 분쇄한 후 폴리비닐 팩에 보관하였다. 또한 앞서 제조한 구리 처리 토양을 일부 분리한 후 상층에 유의한 독성을 나타낸 농도인 750 mg kg⁻¹의 TC를 처리하여 구리와 TC의 혼합 처리 토양 (TCu-0, TCu-1, TCu-2, TCu-3)을 제조하였다.

토양의 토성, pH, 유기물 함량, 중금속 함량, CEC 등은 농업과학기술원 토양 및 식물체 분석법 (NIAS 2000)에 의거 분석하였으며 토양의 식물 가용성 중금속은 Mehlich-III 분석법을 이용하였다 (Mehlich 1984).

2.2 식물의 재배

(주)다농에서 구입한 적치마상추 (*Lactuca sativa* L.)를 실험을 수행하였다. 각각의 처리된 토양을 petri dish (60 × 15 mm)에 35 g 씩 준비한 후, pre-germinated 된

Table 1. Major properties of soil used in this study.

Property		Value	Remark
Texture	Sand (%)	82.1	Loamy fine
	Silt (%)	16.8	
	Clay (%)	1.1	
pH		7.7	
Organic matter (OM) (%)		0.76	
Cation exchange capacity (CEC) (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)		11.88	

Table 2. Total heavy metal concentration of soil after Cu treatment (mean±SD). The letters after numbers indicate significant difference among the treatments at $P<0.05$ by ANOVA and Tukey test.

Treatment	Heavy metal (mg kg ⁻¹)					
	Cu	As	Cd	Ni	Pb	Zn
Cu-0	5.02±1.95 ^c	N.D. ¹	1.75±0.29 ^a	5.90±1.04 ^a	13.03±1.13 ^a	71.13±6.32 ^a
Cu-1	7.63±1.27 ^c	N.D.	1.72±0.21 ^a	6.35±3.07 ^a	8.87±1.54 ^b	72.21±6.14 ^a
Cu-2	14.10±1.66 ^b	N.D.	1.92±0.24 ^a	9.75±4.71 ^a	10.28±0.37 ^b	75.67±8.56 ^a
Cu-3	25.05±2.57 ^a	N.D.	1.71±0.11 ^a	8.37±2.70 ^a	14.45±1.17 ^a	67.80±4.01 ^a

¹Not detected.**Table 3.** Heavy metal availability of soil after Cu treatment (extracted by Mehlich – III method) (mean±SD). The letters after numbers indicate significant difference among the treatments at $P<0.05$ by ANOVA and Tukey test.

Treatment	Heavy metal (mg kg ⁻¹)					
	Cu	As	Cd	Ni	Pb	Zn
Cu-0	0.74±0.06 ^d	N.D. ¹	0.04±0.00 ^a	0.08±0.01 ^a	2.74±0.14 ^a	0.75±0.03 ^a
Cu-1	2.88±0.12 ^c	N.D.	0.04±0.00 ^a	0.08±0.02 ^a	2.85±0.09 ^a	0.74±0.05 ^a
Cu-2	5.78±0.59 ^b	N.D.	0.04±0.00 ^a	0.09±0.02 ^a	2.77±0.23 ^a	0.81±0.09 ^a
Cu-3	12.88±0.88 ^a	N.D.	0.04±0.00 ^a	0.10±0.02 ^a	2.69±0.19 ^a	0.79±0.07 ^a

¹Not detected.

상추 종자를 5 mm 깊이로 10개씩 심었다. 그 후 petri dish를 growth chamber로 옮긴 후, water holding capacity의 약 50% 수준으로 수분과 주간 16 시간 / 야간 8 시간의 광주기 조건에서 실시되었으며 온도는 21±2°C 조건으로 유지시켜 주었다. 각 처리구는 3반복 하였으며 TC의 예비 독성 실험은 1주 그 외는 3주 뒤에 수확하였다.

2.3 식물의 분석

재배가 종료된 식물은 수확 한 후에 바로 뿌리에 붙은 토양 입자를 씻어내기 위하여 수돗물로 충분히 행구고 마지막으로 증류수로 세척하였다. 세척이 완료된 식물체는 Epson Perfection V700 (Epson, Nagano, Japan)를 통하여 스캔하고 이를 이미지 분석 프로그램 (WinRhizo

5.0a, Regent, Canada)을 통하여 작물의 길이 (지상부+지하부)를 측정하였다. 측정된 길이 비교를 통하여 처리구간 독성을 비교, 평가하였다. 이미지 분석 후 식물체의 생중량을 측정하였다 (Koo et al. 2013).

3. 결과 및 고찰

3.1 토양의 특성

실험에 사용한 토양의 주요 특성을 Table 1에 정리하였다. 유기물 함량은 0.76%이며 토성은 양질세사토 (loamy fine)로 pH는 7.7이었다. 실험에 이용된 토양은 평균적인 농경지 토양에 비하여 유기물 함량이 적다. 다른 유기화합물과 마찬가지로 TC 역시 토양 내 유기물에 많이 흡착된다고 알려져 있다 (Jechalke et al.

Table 4. Mortality rate, fresh weight per seedling after tetracycline (TC) treatment. Control and TC-750 are treatments with tetracycline 0 and 750 mg kg⁻¹, respectively. The letters after numbers indicated significant difference among the treatments at $P < 0.05$ by ANOVA and Tukey test.

Property	Control	TC - 750
Mortality rate (%)	18 ^a	14 ^a
Fresh weight per seedling (g)	0.082 ^a	0.086 ^a

2014). 이 때문에 본 실험에 사용된 토양은 평균적인 다른 토양에 비하여 유기물 영향이 적을 것으로 판단되었다.

Table 2에 나타나는 왕수분해법에 따른 토양의 구리 농도에서는 Cu-0과 Cu-1 간의 구리 농도에 유의한 차이가 없었고, Cu-2, Cu-3의 순서대로 유의하게 상승하였다. 이외의 독성을 발현할 수 있는 미량 원소는 납이 Cu-1과 Cu-2에서 농도가 소폭 감소한 것을 제외하고는 관찰되지 않았다. Table 3에 나타난 Mehlich-3 법에 의해서 침출된 유효태 미량원소의 경우에는 왕수 분해법과 다르게 Cu-1에서부터 Cu-0와 비교하여 유의한 구리 농도의 상승을 확인하였으며 Cu-1, Cu-2, Cu-3의 순서로 지속적으로 유의하게 상승하였다. 다른 미량 원소들의 농도는 유의하게 변화하지 않았다. 따라서 본 실험의 구리 처리는 실험 결과에 유의한 영향을 줄 것으로 판단된다.

3.2 상추에 대한 tetracycline의 독성 실험

TC 독성 범위를 알기 위한 1주일간의 노출 실험에서 실험 농도 범위에서 500 mg kg⁻¹까지 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았고, 750 mg kg⁻¹에서 다른 처리구에 비하여 현저하게 생장이 저하되었다 ($P < 0.05$) (Fig. 1). 로지스틱 모델식 (logistic model)을 통하여 TC 노출 시 대조구 대비 50%의 성장 저해를 일으키는 농도인 EC50과 10%의 성장 저해를 일으키는 농도인 EC10을 계산하였다. 실험 농도 범위에서는 EC50이 나타나지 않았으며 (>750 mg kg⁻¹), EC10은 726.83 mg kg⁻¹으로 나타났다. 이후 TC가 처리되지 않은 대조구 (TC-0)와 750 mg kg⁻¹의 TC가 처리된 처리구 (TC-750)에서 3주간 상추를 재배한 결과에서 역시 성장량에 유의한 차이를 확인하였다 (Fig. 2). TC가 처리되지 않은 대조군과 750 mg kg⁻¹가 처리된 처리구의 평균 고사율 (mortality rate, 고사한 개체수 / 파종한 개체수 \times 100), 생중량 (총 무게 / 발아한 개체수)은 유의한 차이를 보이지 않았다 (Table 4).

본 연구 결과에서는 TC에 의한 상추의 생장의 저해

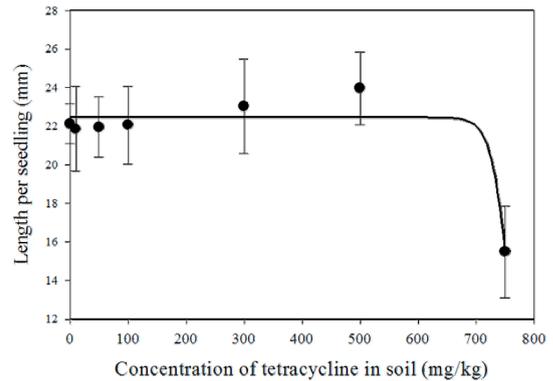


Fig. 1. Elongation of lettuce with exposure to different concentration of tetracycline on soil. Error bar indicates standard deviation.

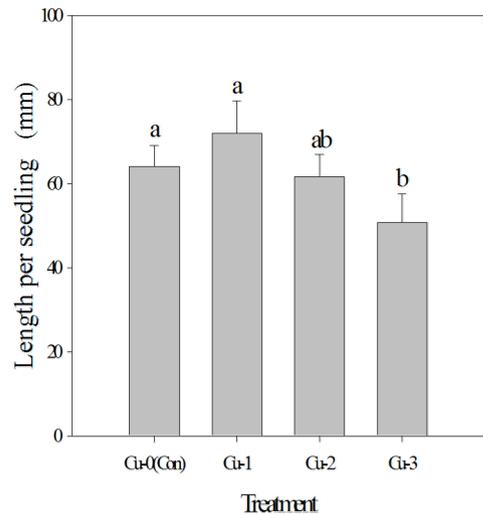


Fig. 2. Length per seedling with different concentration of copper in soil. Copper concentrations in Cu-0, Cu-1, Cu-2, Cu-3 are 5.02, 7.63, 14.10 and 25.05 mg kg⁻¹, respectively. Error bar indicates standard deviation. Means with different letters indicate significant difference at $P < 0.05$ by ANOVA and Tukey test.

를 확인할 수 있었다. TC에 의한 식물의 성장 저해는 기존의 연구에서도 다양한 조건에서 확인되었다. Hillis et al. (2014)의 연구에서는 알파파, 당근, 상추 등에서 TC에 의한 독성을 확인하였고, Pomati et al. (2004)의

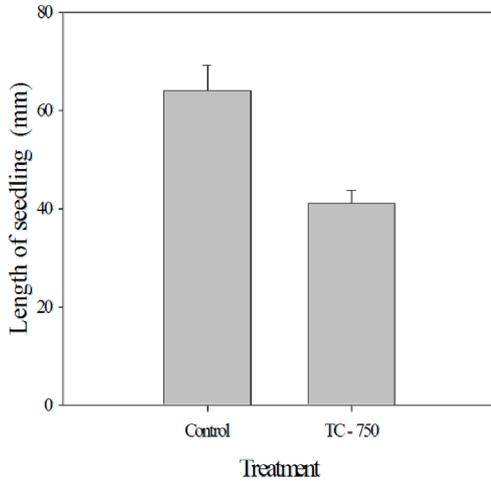


Fig. 3. Length of seedling on control and TC-750. Control and TC-750 are treatments with tetracycline 0 and 750 mg kg⁻¹, respectively. Error bar indicates standard deviation.

연구에서는 좀개구리밥을 대상으로 고농도의 TC가 생장에 저해를 일으킴을 확인하였다. 또한 Hillis et al. (2014)의 연구에서 상추의 EC10과 EC50의 값은 각각 1.815, >10 mg L⁻¹으로 본 연구 결과에서 나타나는 EC10 값인 726.83 mg kg⁻¹에 비하여 480배 가량 낮았다. 이를 통하여 TC가 수경 재배를 통하여 노출되었을 때 비하여 토양을 통하여 노출되었을 때 더 낮은 독성을 나타낸다는 사실을 확인할 수 있었다.

3.3 구리 함량에 따른 상추의 성장 비교

구리 단독 처리를 한 Cu-0, Cu-1, Cu-2, Cu-3 처리구에서 자란 상추의 길이는 각각 64.02, 71.87, 61.60 및 50.69 mm로 처리한 구리 함량에 따라서 식물체의 성장 정도가 다르게 나타났다(Fig. 3). Cu-0 비교하여 Cu-1과 Cu-2에서의 상추의 길이는 유의한 차이를 나타내지 않았지만, Cu-3에서는 유의하게 감소하였다. Cu-3는 Cu-0와 비교하여 성장 저해가 나타난 것을 확인할 수 있었다. 상추의 생중량은 Cu-1에서는 유의한 차이가

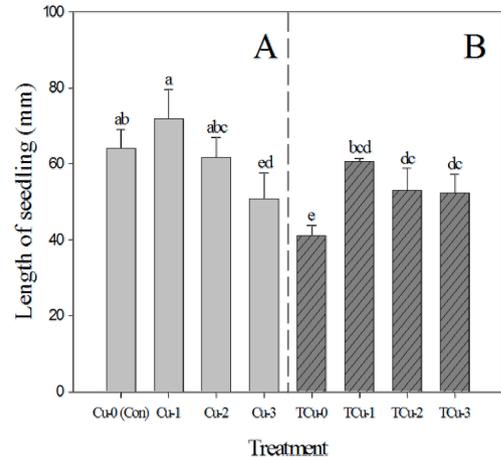


Fig. 4. Length per seedling with different treatment soil. Error bar indicates standard deviation. Means with different letters indicate significant difference at $P < 0.05$ by ANOVA and Tukey test.

나지 않고 Cu-2, Cu-3에서 생중량의 감소가 확인되었지만, 평균 고사율은 Cu-0과 비교하여 Cu-1, Cu-2, Cu-3의 모든 처리구에서 고사율이 유의 상승하였음을 확인하였다 (Table 5).

본 실험 결과에서 Cu-1과 Cu-2에서 상추의 구리 흡수는 영양분으로 활용 가능한 수준으로 독성이 나타나지 않았지만, Cu-3에서의 구리 흡수량은 영양분으로의 활용 범위를 넘어서 독성이 발현된 것으로 판단된다. 구리는 식물의 필수원소로 알려져 있으며 미량 필수원소로 분류되어 있다. 토양수 내에서 구리의 농도가 0.1 mg kg⁻¹ 미만일 때는 결핍 증상으로 인하여 식물 생육이 불가능하다고 알려져 있다 (Mocquot et al. 1996). 구리가 부족한 농업용 토양에서는 추가로 시비하여 생산량을 유지시키기도 한다 (Baker and Walker 1989). 반면 토양 중에 구리의 함량이 지나치게 높을 경우에는 광합성 기작과 효소 생산에 영향을 주어 성장을 억제하여 식물에 피해를 주기도 한다.

Table 5. Mortality rate and fresh weight per seedling of lettuce on Cu treatments. The letters after numbers indicated significant difference among the treatments at $P < 0.05$ by ANOVA and Tukey test.

Property	Treatment			
	Cu-0	Cu-1	Cu-2	Cu-3
Mortality rate (%)	18 ^a	8 ^b	4 ^b	4 ^b
Fresh weight per seedling (g)	0.082 ^a	0.086 ^a	0.076 ^b	0.063 ^c

Table 6. Mortality rate and fresh weight per seedling of lettuce on TCu treatments. The letters after numbers indicated significant difference among the treatments at $P < 0.05$ by ANOVA and Tukey test.

Property	Treatment			
	TCu-0	TCu-1	TCu-2	TCu-3
Mortality rate (%)	14 ^a	16 ^a	20 ^a	8 ^a
Fresh weight per seedling (g)	0.086 ^{ab}	0.088 ^a	0.079 ^{bc}	0.074 ^c

3.4 상추에 대한 tetracycline의 성장 저해에 미치는 토양 구리의 영향

상추에 대하여 TC가 미치는 성장 저해에 토양 구리가 미치는 영향을 확인하기 위하여, TC가 동일하게 750 mg kg⁻¹으로 처리되었지만 토양 내 구리 함량이 다른 각각의 처리구 TCu-0, TCu-1, TCu-2, TCu-3에서 3주간 상추를 재배하였고 그 결과, TCu-0에 비하여 구리 함량이 높은 세 가지 처리구 TCu-1, TCu-2, TCu-3 모두에서 상추의 생장이 유의하게 증가하였지만 세 처리구 간에는 유의한 차이가 존재하지 않았다(Fig. 3). 각 처리구별로 고사율은 각각 14, 16, 20 및 8%로 통계적으로 유의한 차이가 나지 않고 모두 같은 수준으로 나타났다. 생중량은 TCu-1는 TCu-0과 유의한 차이를 나타내지 않았고, TCu-2와 TCu-3는 TCu-1에 비하여 유의하게 감소하였다(Table 6).

대표적인 2:1 토양 점토 광물인 montmorillonite에 대하여 구리와 TC의 흡착에서 상호작용을 연구한 결과에 따르면 구리가 없는 수용액보다 구리가 같이 존재하고 있을 때 TC의 흡착이 증가하는 것을 확인하였다. TC와 구리의 결합체가 TC이온 홀로 있는 것보다 montmorillonite 대하여 흡착계수가 높았다(Wang et al. 2008). 대표적 1:1 광물인 kaolinite는 montmorillonite와 비교하여 적은 음전하와 CEC를 가지며 내부층위를 가지고 있지 않기 때문에 표면적이 적음에도 kaolinite를 대상으로 한 연구에서 구리가 존재할 시 흡착이 크게 증가한다고 보고하였다(Zhao et al. 2011b). 이는 구리 이온이 kaolinite의 표면에 내부 계면 결합(inner-sphere complex)를 통하여 구리가 표면에 단단히 결합하여 TC의 여러 화학종들과 kaolinite 사이에서 구리 이온이 다리역할을 하기 때문이라고 설명하였다(Zhao et al. 2011b).

본 연구 결과에서 구리의 처리에 의해서 TC가 처리된 토양에서 자란 상추의 성장 저해가 감소하는 것을 확

인하였다. 기존의 연구 결과와 마찬가지로 토양 내 구리에 의한 TC의 흡착으로 인하여 상추가 흡수한 TC가 감소한 결과로 보인다. 또한 TCu-2와 TCu-3의 생중량이 감소한 것은 과량의 구리로 인해 독성이 발현된 것으로 판단된다.

4. 결론

실험 토양에서 상추에 대한 TC의 식물 독성 실험 결과, 750 mg kg⁻¹ 수준에서 대조구와 유의한 차이가 나타났다. 이전 연구들과 마찬가지로 TC에 의하여 상추의 전체 길이가 짧아졌지만 이는 수용액에서 상추 독성이 발현되는 농도와 비교하여 400배 가까이 높은 값을 보여 수용액에서와 토양에서의 독성 발현이 달라짐을 확인할 수 있었다. 구리 처리에 따른 상추의 생장을 살펴보면, 대조구인 Cu-0와 비교하여 구리가 추가된 Cu-1, Cu-2, Cu-3의 상추에서 생장이 증가하는 것을 확인하였으며, Cu-1의 경우에서 길이가 가장 크게 나타났고 구리 함량이 증가한 Cu-2와 Cu-3에서는 감소하였다. 이는 구리가 미량 필수 원소로 적정량은 성장에 도움이 되지만 다량의 구리는 오히려 독성을 나타낸 것을 의미한다.

마지막으로 구리의 처리 농도가 TC의 상추 성장저해에 미치는 영향을 확인한 결과 같은 TC가 처리되었음에도 구리가 추가된 처리구에서는 피해폭이 감소하였다. 이는 구리 처리가 TC의 토양 표면 결합과 흡착이 증가하여 생물 유효도가 감소하였기 때문에 상추에 대한 악영향이 감소한 것으로 판단되며, 구리함량이 많아지는 경우에는 그 독성 저감 효과가 떨어지는데 이는 높은 구리 농도로 인한 독성인 것으로 판단된다. 이러한 토양 실험에서의 결과는 TC의 효과 농도가 높아지는 점 이외에는 수용액 상의 연구 결과와 유사한 패턴을 나타냈다.

종합해보면 TC로 오염된 농경지나 토양에 적정량의

구리 처리는 식물 성장 감소 방지에 도움이 될 것으로 보인다. 그러나 과량의 구리 처리는 독성으로 작용할 수 있으므로 적절한 처리량에 관한 후속연구가 필요해 보인다. 더하여 TC 오염 영향을 평가함에 있어 절대적인 농도뿐 아니라 토양의 특성과 양이온의 함량 등을 종합적으로 고려해야 할 것이다.

감사의 글

This study was granted by Korea University and partly funded by the Korea Ministry of Environment (MOE) as “Climate Change Correspondence Program”.

References

- Albert, A. and Rees, C.W. 1956. Avidity of the tetracyclines for the cations of metals. *Nature* 177: 433-434.
- Bahrami, F.L., Morris, D. and Pourgholami, M.H. 2012. Tetracyclines: drugs with huge therapeutic potential. *Mini Reviews in Medicinal Chemistry* 12(1): 44-52.
- Baker, A.J.M. and Walker, P. 1989. Physiological responses of plants to heavy metals and the quantification of tolerance and toxicity. *Chemical Speciation and Bioavailability* 1(1): 7-17.
- Blackwell, P.A. Kay, P. and Boxall, A.B. 2007. The dissipation and transport of veterinary antibiotics in a sandy loam soil. *Chemosphere* 67(2): 292-299.
- Boonsaner, M. and Hawker, D.W. 2013. Evaluation of food chain transfer of the antibiotic oxytetracycline and human risk assessment. *Chemosphere* 93(6): 1009-1014.
- Boxall, A.B., Johnson, P., Smith, E.J., Sinclair, C.J., Stutt, E. and Levy, L.S. 2006. Uptake of veterinary medicines from soils into plants. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 54(6): 2288-2297.
- Carter, L.J., Garman, C.D., Ryan, J., Dowle, A., Bergström, E., Thomas-Oates, J. and Boxall, A.B. 2014. Fate and uptake of pharmaceuticals in soil-earthworm systems. *Environmental Science and Technology* 48(10): 5955-5963.
- Daoust, C.M., Bastien, C. and Deschênes, L. 2006. Influence of soil properties and aging on the toxicity of copper on compost worm and barley. *Journal of Environmental Quality* 35(2): 558-567.
- Figuroa-Diva, R.A., Vasudevan, D. and MacKay, A.A. 2010. Trends in soil sorption coefficients within common antimicrobial families. *Chemosphere* 79(8): 786-793.
- Halling-Sørensen, B. 2000. Algal toxicity of antibacterial agents used in intensive farming. *Chemosphere* 40(7): 731-739.
- Hillis, D.G., Fletcher, J., Solomon, K.R. and Sibley, P.K. 2011. Effects of ten antibiotics on seed germination and root elongation in three plant species. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 60(2): 220-232.
- Jechalke, S., Heuer, H., Siemens, J., Amelung, W. and Smalla, K. 2014. Fate and effects of veterinary antibiotics in soil. *Trends in Microbiology* 22(9): 536-545.
- Jjemba, P.K. 2002. The potential impact of veterinary and human therapeutic agents in manure and biosolids on plants grown on arable land: a review. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 93(1): 267-278.
- Jones, A.D., Bruland, G.L., Agrawal, S.G. and Vasudevan, D. 2005. Factors influencing the sorption of oxytetracycline to soils. *Environmental Toxicology and Chemistry* 24(4): 761-770.
- Koo, N., Kim, M.S., Hyun, S. and Kim, J.G. 2013. Effects of the incorporation of phosphorus and iron into arsenic-spiked artificial soils on root growth of lettuce using response surface methodology. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 44(7): 1259-1271.
- Kulshrestha, P., Giese, R.F. and Aga, D.S. 2004. Investigating the molecular interactions of oxytetracycline in clay and organic matter: insights on factors affecting its mobility in soil. *Environmental Science and Technology* 38(15): 4097-4105.
- Li, Z., Schulz, L., Ackley, C. and Fenske, N. 2010. Adsorption of tetracycline on kaolinite with pH-dependent surface charges. *Journal of Colloid and Interface Science* 351(1): 254-260.
- Liu, F., Ying, G.G., Tao, R., Zhao, J.L., Yang, J.F. and Zhao, L.F. 2009. Effects of six selected antibiotics on plant growth and soil microbial and enzymatic activities. *Environmental Pollution* 157(5): 1636-1642.
- Mehlich, A. 1984. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in Soil Science & Plant Analysis* 15(12): 1409-1416.
- Mocquot, B., Vangronsveld, J., Clijsters, H. and Mench, M. 1996. Copper toxicity in young maize (*Zea mays* L.) plants: effects on growth, mineral and chlorophyll contents, and enzyme activities. *Plant and soil* 182(2): 287-300.
- NIAS. 2000. Methods of Analysis of Soil and Plant. National institute of Agricultural Science and Technology, Suwon, Korea. (in Korea)
- Pomati, F., Netting, A.G., Calamari, D. and Neilan, B.A. 2004. Effects of erythromycin, tetracycline and ibuprofen on the growth of *Synechocystis* sp. and *Lemna minor*. *Aquatic Toxicology* 67(4): 387-396.
- Sarmah, A.K., Meyer, M.T. and Boxall, A.B. 2006. A global perspective on the use, sales, exposure pathways, occurrence, fate and effects of veterinary antibiotics (VAs) in the environment. *Chemosphere* 65(5): 725-759.
- Sassman, S.A. and Lee, L.S. 2005. Sorption of three tetracyclines by several soils: assessing the role of pH and

- cation exchange. *Environmental Science and Technology* 39(19): 7452-7459.
- Song, W. and Guo, M. 2014. Residual veterinary pharmaceuticals in animal manures and their environmental behaviors in soils. In, He, Z. and Zhang, H. (eds.), *Applied Manure and Nutrient Chemistry for Sustainable Agriculture and Environment*. Springer, Dordrecht, Netherlands. pp. 23-52.
- Thiele-Bruhn, S. 2003. Pharmaceutical antibiotic compounds in soils-a review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 166(2): 145-167.
- Tolls, J. 2001. Sorption of veterinary pharmaceuticals in soils: a review. *Environmental Science and Technology* 35(17): 3397-3406.
- Wang, Q., Guo, M. and Yates, S.R. 2006. Degradation kinetics of manure-derived sulfadimethoxine in amended soil. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 54(1): 157-163.
- Wang, Y.J., Jia, D.A., Sun, R.J., Zhu, H.W. and Zhou, D.M. 2008. Adsorption and cosorption of tetracycline and copper (II) on montmorillonite as affected by solution pH. *Environmental Science and Technology* 42(9): 3254-3259.
- Zhao, Y., Geng, J., Wang, X., Gu, X. and Gao, S. 2011a. Adsorption of tetracycline onto goethite in the presence of metal cations and humic substances. *Journal of Colloid and Interface Science* 361(1): 247-251.
- Zhao, Y., Geng, J., Wang, X., Gu, X. and Gao, S. 2011b. Tetracycline adsorption on kaolinite: pH, metal cations and humic acid effects. *Ecotoxicology* 20(5): 1141-1147.
- Zhao, Y., Tan, Y., Guo, Y., Gu, X., Wang, X. and Zhang, Y. 2013. Interactions of tetracycline with Cd (II), Cu (II) and Pb (II) and their cosorption behavior in soils. *Environmental Pollution* 180: 206-213.