

Effects of Organic Matter Concentration in Soil on Phytoavailability of Cadmium in Medicinal Plants

Yong-dong Noh, Kwon-Rae Kim¹, Won-Il Kim², Ki-Yuol Jung³, and Chang Oh Hong*

Department of Life science and Environmental Biochemistry, Pusan National University 1268-50 Miryang, 627-706 South Korea

¹Dept. of Agronomy and Medicinal Plant Resources, GNTECH Jinju, 660-758, South Korea

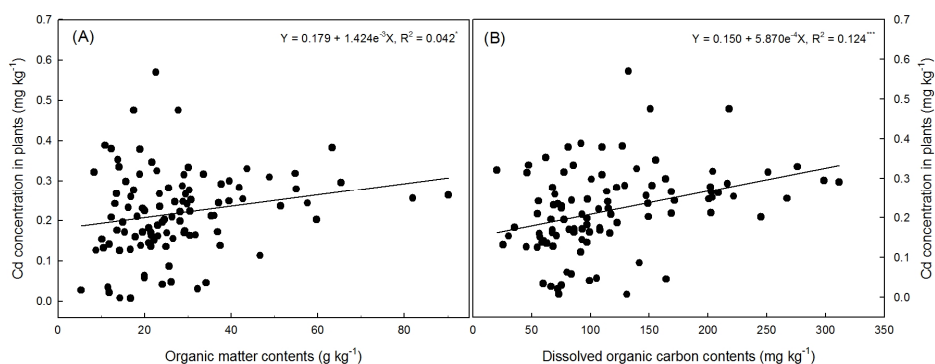
²Chemical Safety Division, National Academy of Agricultural Science, Jeonju, 560-500, South Korea

³Department of Functional Crop, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, Miryang, Gyeongnam 627-803, Korea

(Received: July 21 2015, Revised: September 14 2015, Accepted: September 19 2015)

The safety of plant species used as a source for herbal medicines and dietary supplements has recently been questioned due to poisonings associated with the presence of cadmium (Cd) in these plants. These plants can derive Cd from their presence in the soil. Organic matter (OM) concentrations in soils could affect the availability of Cd for plants. To determine the effect of OM concentration in soil on the concentration of plant available Cd and uptake of this toxic element by medicinal plants, soil and plant samples were collected from 102 fields supporting for 5 species of medicinal plants in 6 province of South Korea. Concentrations of OM and dissolved organic carbon (DOC) in soils affected the phytoavailability of Cd. One M NH₄OAc extractable Cd concentration in soil increased with increasing OM concentrations. There were significantly positive relationships between 1 M NH₄OAc extractable Cd concentration and OM concentration in soil and between 1 M NH₄OAc extractable Cd concentration and DOC concentration. Likewise, OM and DOC concentrations significantly affected Cd concentration in medicinal plant soils. Cadmium concentration in medicinal plants increased with increasing OM concentration in soil [Cd concentration (mg kg⁻¹) = 0.179 + 1.424 × 10⁻³ OM concentrations, R² = 0.042*] and with DOC concentration [Cd concentration (mg kg⁻¹) = 0.150 + 5.870 × 10⁻⁴ DOC concentrations, R² = 0.124***]. These results might result from Cd-DOC complex which is easily absorbed Cd form by plant root. Dissolved organic carbon concentration had more positive relationship with Cd concentration in medicinal plants and 1 M NH₄OAc extractable Cd concentration in soils than OM. Cadmium concentration in all 5 species of medicinal plant (*Atractylodes macrocephala Koidzumi*, *Astragalus membranaceus*, *Codonopsis lanceolata*, *Platycodon grandiflorum*, and *Rehmannia glutinosa*) significantly increased with increasing DOC concentration in soil. From the above results, formation of Cd-DOC complex caused by OM application might be mainly attributed to increase in Cd concentration in medicinal plants.

Key words: Organic matter, Dissolved organic matter, Cadmium, Mobilization



The relationships between Cd concentration in medicinal plants and organic matter concentrations (A) and dissolved organic carbon concentrations (B) in soils

*Corresponding author : Phone: +82553505548, Fax: +82553505549, E-mail: soilchem@pusan.ac.kr

§Acknowledgement : This study was carried out with the support of "Research Program for Agricultural Science & Technology Development (Project No. PJ009828032015)", National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration, Republic of Korea.

Introduction

최근 들어 국내의 경제수준 발달과 삶의 질이 향상됨에 따라 건강과 장수에 대한 관심이 높아지고 있으며, 약재로도 이용이 되며, 건강기능성 식품의 원료로도 이용이 되는 약용작물에 대한 관심이 증가하고 있다. 약용작물의 연간 생산량의 경우 2003~2004년 4만 4000여 톤, 2009~2011년 6만 2000여 톤, 2012년에는 9만 톤으로 증가하는 추세이다 (MAFRA, 2013). 이러한 약용작물의 품질과 안정성을 위해 식품의약품안전처에서 식품의 기준 및 규격을 고시하여 관리를 하고 있으나 (MFDS, 2014), 국내 유통되고 있는 약용작물들 내 중금속의 함량이 검출됨에 따라 사회적인 문제로 부각되고 있다 (Jung et al., 2011; Kim et al., 1994; Lee et al., 2008).

중금속들 중에서도 카드뮴은 소량으로도 인체에 유입 시 독성을 유발하는 것으로 알려져 있다. 카드뮴의 급성중독은 주로 카드뮴 염의 섭취로 일어나며 두통, 경련, 소화관 장애 등을 일으키며 만성중독은 주로 빈혈, 신장손상에 의한 골연화증인 이타이이타이 병을 유발한다 (Joshi et al., 1981).

퇴비와 비료의 사용을 통해 토양으로 투입된 카드뮴과 소량이지만 자연발생적으로 재배지 토양 내 존재하는 카드뮴은 약용작물들의 식물체 내로 흡수되게 된다. 여러 연구에서 토양 내 식물이 이용 가능한 형태의 중금속들은 식물체 내 중금속 흡수량과 유의한 상관관계를 가지고 있다고 보고하였다 (Ruby et al., 1993). 식물이 이용 가능한 형태의 카드뮴 함량은 pH, 유기물 함량, 양이온 교환용량 (CEC) 과 같은 토양의 화학적 특성에 영향을 받는다 (Kim et al., 2007). 농경지 토양에서 이러한 화학적 특성은 무기질 비료 및 퇴비의 사용에 영향을 받아 변화하게 된다.

국내 약용작물 재배지에서는 토양 내 유기물 함량의 증진과 양분공급의 목적으로 퇴비가 지속적으로 사용되고 있다. 토양 내 퇴비를 사용하면 토양의 음하전도를 증대시켜 양이온성의 중금속인 카드뮴이 흡착되어 카드뮴의 식물이용성을 낮출 수 있다 (Bolan et al., 2003c; Li et al., 2006). 반면에 몇몇의 연구에서는 토양 내 카드뮴은 퇴비에서 기인된 용존유기탄소 (Dissolved organic carbon)와 결합하여 식물에 대한 이용성이 증가한다고 보고하였다 (Antoniadis and Alloway, 2002). 또한 부적절한 부자재로 만들어진 퇴비는 카드뮴과 다양한 중금속을 포함하고 있어 장기간 농경지에 사용 시 토양 및 재배작물 내 중금속의 축적을 유발할 수 있다 (Pinamonti et al., 1997).

이상과 같이 토양 내 유기물이 카드뮴의 식물이용성에 미치는 효과는 불분명한 것으로 조사되어 왔다. 따라서 본 연구는 국내의 약용작물재배지 토양 내 유기물의 함량이 식물이 이용 가능한 형태의 카드뮴 함량과 약용작물 내 카드뮴의 함량에 미치는 영향을 구명하고자 실시되었다.

Materials and Methods

약용작물 재배지 토양 및 식물체 시료 채취 연구에 이용한 시료는 전국 6개도에서 생산되는 약용작물 (*Angelica gigas Nakai*, *Astragalus membranaceus BUNGE*, *Codonopsis lanceolata*, *Platycodon grandiflorum*, *Rehmannia glutinosa*) 과 약용작물 재배지 토양을 대상으로 조사하였다. 지역별로는 강원도 21지점, 경상남도 18지점, 경상북도 9지점, 전라남도 13지점, 충청남도 19지점, 충청북도 23지점의 약용작물 재배지를 선정하였으며, 작물별로는 당귀 17지점, 더덕 22지점, 도라지 26지점, 지황 25지점, 황기 12지점으로써 102 지점의 약용작물 재배지에서 토양 및 식물체 시료를 채취하였다. 약용작물 재배지 토양 시료의 경우에 약용작물 재배지 토양의 한 지점으로부터 3곳을 무작위로 선정한 후 표층 (0~15 cm) 부위를 채취하였으며, 혼합하여 하나의 시료로써 실험에 사용하였다. 식물체 시료의 경우 토양과 동일하게 한 지점으로부터 3곳을 무작위로 선정한 다음 약용으로 이용되는 지하부를 모종삽을 이용하여 지하부가 상하지 않게 하고 토양을 최대한 털어내 채취하였으며, 혼합하여 하나의 시료로써 분석에 이용하였다. 토양과 식물체 시료 채취 기간은 2013년 9월 1일부터 2013년 10월 30일까지 수행하였다.

약용작물 재배지 토양 및 식물체 시료 전처리 약용작물 재배지 토양 시료는 먼저 표층의 육안으로 보이는 식물체 잔뿌리들을 제거하기 위해 8 mm 체를 이용하여 제거한 후 건조실에서 풍건하였으며 유기물함량과 용존 유기탄소 함량, 카드뮴 함량 분석을 위해 2 mm 체로 거른 것을 이용하였다. 약용작물은 뿌리를 증류수로 깨끗이 씻은 후 잘게 잘라 건조실에서 1차 건조를 시켰으며, 건조기로 옮겨 105°C에서 24시간동안 2차 건조하였다. 2차 건조가 완료된 식물체는 분쇄기를 이용하여 곱게 분쇄시켜 실험에 이용하였다.

토양 내 pH, 유기물 함량과 용존 유기탄소 함량 및 중금속 함량 조사 재배지 토양의 pH 함량은 토양:증류수 비 1:5 (w/w)로 하여 pH meter (starter 3000, Ohaus, USA)로 측정 하였으며, 유기물 함량은 Wakley and Black 방법 (Allison et al., 1965), 토양 내의 용존 유기탄소 함량은 시료와 증류수의 비를 1:5로 하여 진탕기에서 150 rpm, 1 h에서 진탕 후 No.2 Filter paper를 이용하여 침출하였으며, 침출액은 Total organic carbon meter (TOC, analytic jena, Germany)를 이용하여 분석하였다.

재배지 토양 내에서 식물이 이용 가능한 형태의 카드뮴 함량 분석을 위해 토양 시료 3 g에 1 M NH₄OAc 용액 30 ml를 50 ml 플라스틱 튜브에 넣은 후 30분 동안 진탕을 하였

으며, 진탕 후 No.2 filter paper를 이용하여 침출하였다 (Symeonides and McRae 1977). 카드뮴의 함량은 Inductively coupled plasma-mass spectrophotometer (ICP-MS, Thermo Scientific iCAP Q, Bremen, Germany)로 측정하였다.

약용작물 내 카드뮴 함량을 측정하기 위해 식물체 시료 0.2 g에 분해액 (HNO₃:H₂SO₄:HClO₄, 10:1:4 volume/volume) 10 ml 를 가해 hot plate에서 분해하였으며, 분해액은 50 ml 로 부피 플라스크에 맞춘 후 atomic absorption spectrometer (AAS, Perkin Elemer Model 3300, USA) 로 측정하였다.

통계처리 약용작물 재배지 토양 내 유기물 함량 및 용존 유기탄소함량이 1 M NH₄OAc로 침출 가능한 카드뮴 및 약용작물 내 카드뮴 함량에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Sigma plot (version 8.0)을 이용하여 직선 회귀식을 구하였고 1 M NH₄OAc 로 침출 가능한 카드뮴 함량과 약용작물들 내 카드뮴 함량의 상관관계식을 구하였다. 회귀식과 상관관계식의 유의성 검정은 상관계수 (r)의 유의수준표를 이용하여 r 값의 유의수준이 $p < 0.05$, $p < 0.01$ 그리고 $p < 0.001$ 일 때 *, **, ****로 나타내었다.

Results and Discussion

토양 내 카드뮴의 총 함량에 대한 영향 총 102지점의 약용작물 재배지에서 채취된 토양 내 카드뮴의 함량은 토양환경보존법의 토양오염우려기준치인 4 mg kg⁻¹을 초과하는 지점이 없는 것으로 조사되었다 (Table 1). 또한 토양 내 카드뮴 총 함량의 평균은 0.036 mg kg⁻¹으로 우리나라 밭토양의 평균 카드뮴 함량 0.135 mg kg⁻¹ (Jung et al., 1998) 보다 낮은 것으로 조사되었다 (Table 1). 약용작물 재배지 토양 내 평균 유기물의 함량은 23.8g kg⁻¹으로 우리나라 밭토양의 평균 유기물 함량 24.0 g kg⁻¹ (Jung et al., 2001)과 유사한 것으로 조사되었다. 대부분의 약용작물 재배지에서는 토양의 물리적 구조 개선과 양분 공급의 목적으로 다량의 유기물제재를 사용하고 있다. 그러나 중금속을 포함하는 부적절한 부자재로 만들어진 축분퇴비를 토양에 사용하면 토양 및 재배작물 내 중금속의 축적을 유발할 수

있다. 또한 농촌진흥청에서 유기질 비료 및 퇴비 내 카드뮴의 최대 허용치 (5 mg kg⁻¹)를 고시하여 검사 및 등록 후 유통되고 있으나 소량의 카드뮴이 포함된 유기물 제재를 토양에 장기간 사용하면 카드뮴의 축적을 유발할 수 있다 (RDA, 2013). Lipoth and Schoenau (2007)은 장기간 축분퇴비의 토양 연용에 따른 토양 및 작물 내 카드뮴의 축적을 보고하였다. 본 연구에서도 토양 내 유기물의 함량이 증가함에 따라 토양 내 카드뮴의 총 함량이 유의하게 증가하는 결과를 나타내었다 (Fig. 1). 조사대상이 되었던 102지점의 약용작물 재배지에서는 우분퇴비, 돈분퇴비, 계분퇴비, 볏짚, 왕겨, 유박 등 다양한 원료로 만들어진 유기물 제재를 사용한 것으로 조사되었다. 앞에서의 결과와 같이 카드뮴이 포함되어 있는 축분퇴비와 같은 유기물제재의 과다한 사용은 토양 내 카드뮴 함량의 증대를 야기할 수 있을 것으로 판단된다.

토양 내 유기물의 함량과 카드뮴의 총 함량의 관계의 결정계수 (R²)값은 0.13^{***}으로 다소 낮게 나타났다. 다양한 요인이 낮은 결정계수 값에 영향을 미칠 수 있는데 그 중 주로 두 가지의 원인에 의해 기인된 것으로 판단된다. 첫 번째는 관측치의 수가 총 102개이므로 데이터간의 큰 변이 차에 의한 것으로 판단되며 두 번째는 인산비료와 같이 카드뮴을

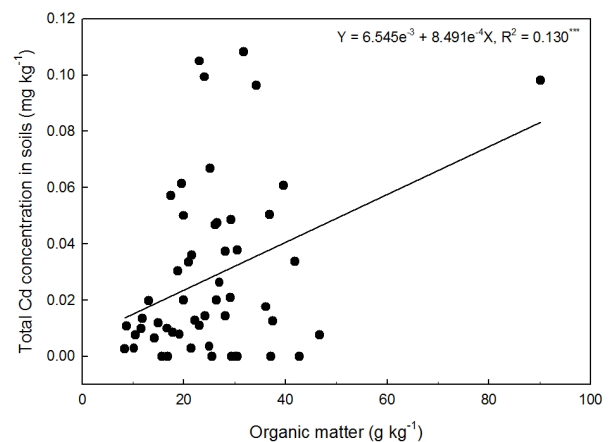


Fig. 1. The relationships between total Cd concentration and organic matter in soils collected from 102 medicinal plant fields (*, **, and *** denote significance at $p < 0.05$, $p < 0.01$, and $p < 0.001$, respectively).

Table 1. Selected properties of soils collected from 102 medicinal plant fields.

	Total Cd ^a (mg kg ⁻¹)	1 M NH ₄ OAc extractable Cd (μg kg ⁻¹)	OM ^b (g kg ⁻¹)	DOC ^c (mg kg ⁻¹)
Maximum.	0.290	0.057	63.3	312
Minimum.	0.003	0.010	4.86	8.4
Average.	0.036	0.022	23.8	106

^aTotal Cd = total cadmium concentration in soils.

^bOM = Organic matter concentration in soils.

^cDOC = Dissolved organic carbon concentration in soils.

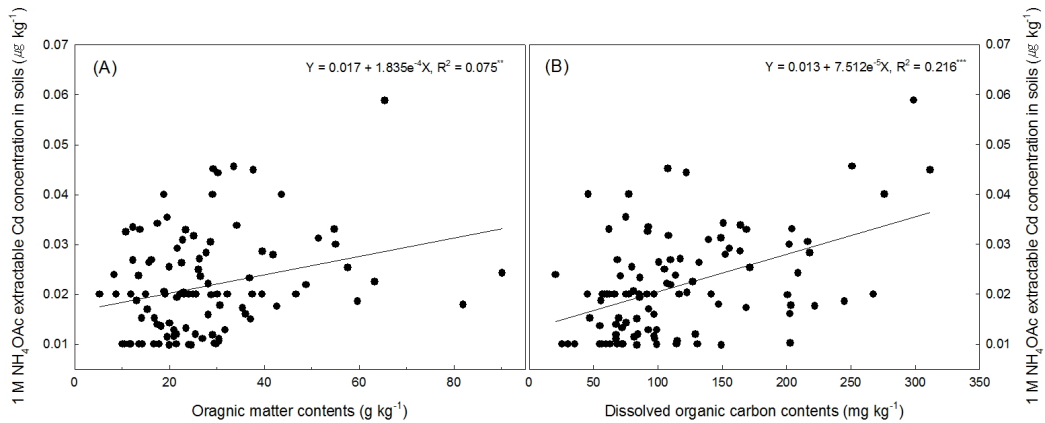


Fig. 2. The relationships between 1 M NH_4OAc extractable Cd concentration and organic matter concentrations (A) and dissolved organic carbon concentrations (B) in soils collected from 102 medicinal plant fields (*, **, and *** denote significance at $p < 0.05$, $p < 0.01$, and $p < 0.001$, respectively).

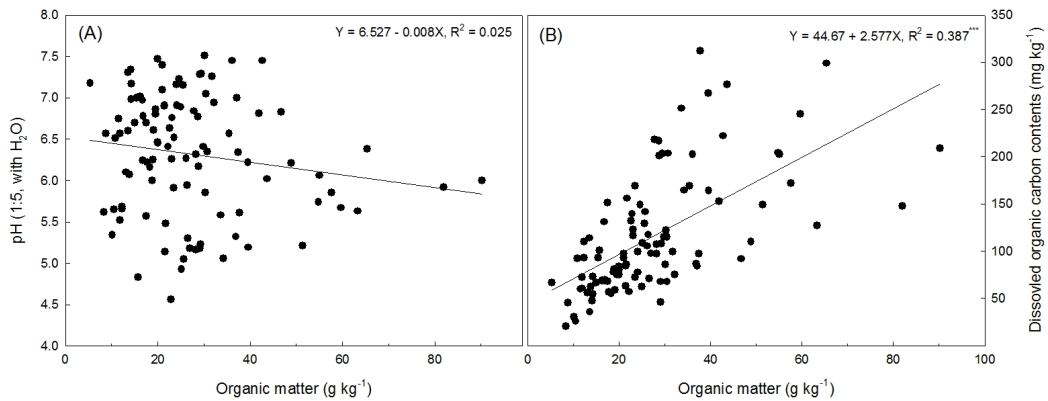


Fig. 3. Correlations between organic matter concentrations and soil pH (A) and dissolved organic carbon concentrations (B) in soils collected from 102 medicinal plant fields (*, **, and *** denote significance at $p < 0.05$, $p < 0.01$, and $p < 0.001$, respectively).

포함하고 있는 비료의 사용에 대한 고려를 제외시켰기 때문에 판단된다.

토양 내 유효태 카드뮴의 함량에 대한 영향 토양 내 존재하는 카드뮴은 분획특성에 따라 수용성 형태, 치환성 형태, 산화물에 결합된 형태, 유기물에 흡착된 형태, 광물격자에 결합되어 쉽게 용출되는 않는 형태 등 다양한 형태로 존재한다 (Ure et al., 1993). 이러한 카드뮴은 토양으로부터 용출되는 정도에 따라 식물흡수에 대해 유효한 형태와 유효하지 않은 형태로 분류될 수 있다. 현재까지 유효한 형태의 카드뮴을 측정하는 방법이 여러 논문에서 보고되었으나 1 M NH_4OAc 로 침출 가능한 카드뮴의 형태를 유효한 카드뮴의 형태로 간주하는 연구가 비교적 많아 본 연구에서는 1 M NH_4OAc 로 침출 가능한 형태의 카드뮴을 유효태 카드뮴으로 보고하였다 (Bolan et al., 2003b, 2003c; Meers et al., 2007).

토양 내 유효태 카드뮴의 함량은 유기물의 함량과 유의한 정적 관계 ($R^2 = 0.075^{**}$)를 나타내었다 (Fig. 2(A)). 즉,

토양 내 유기물의 함량이 높으면 식물 흡수에 대한 카드뮴의 유효도가 증가될 수 있다는 결과이다. 그러나 이러한 결과는 일부의 관련된 연구결과들과 반대되는 결과이다. 유기물은 외부표면에 카르복실기 (COOH), 하이드록실기 (OH) 등과 같이 음하전을 띠고 있는 작용기를 다량으로 포함하고 있어 토양에 시용 시 토양용액의 수소이온 (H^+)을 흡착시켜 토양의 pH를 증가시키고 카드뮴의 용해도를 낮추게 된다 (Kashem and Singh, 2001; McBride, 1994). 일부의 연구에서는 토양 내 유기물 제제의 시용량을 증가시키기에 따라 토양의 pH가 증대하고 유효태 카드뮴의 함량이 감소하는 결과를 보고하였다 (Bolan et al., 2003c; Liu et al., 2009). 그러나 다른 연구에서는 토양 내 유기물 제제의 시용량을 증가시키기에 따라 유효태 카드뮴의 함량이 증가한다고 보고하였다 (Hyun et al., 1998). 이러한 연구들에서는 유기물의 시용에 의해 증가된 용존 유기탄소가 카드뮴과 복합체를 형성하여 카드뮴의 유효도가 증가한다고 보고하였다. 본 연구에서 토양 내 유기물의 함량이 증가함에 따라 토양의 pH가 증가하지 않았으며 토양 내 유기물 함량과 토양 pH와의 유의한 관계도 나타나지 않았다 (Fig. 3(A)). 그러나 토양 내

유기물 함량과 용존 유기탄소의 함량은 유의한 정의 관계 ($R^2 = 0.387^{***}$)를 나타내었으며 토양 내 유기물 함량이 증가함에 따라 용존 유기탄소의 함량이 증가하였다 (Fig. 3(B)). 토양 내 유기물 함량의 증가는 용존 유기탄소의 함량의 증가를 초래하며 증가된 용존 유기탄소는 카드뮴과 복합체를 형성하여 카드뮴의 유효도를 증대시킨다. Fig. 2(B)에서 보는 바와 같이 토양 내 용존 유기탄소의 함량이 증가함에 따라 유효태 카드뮴의 함량이 유의하게 증가한다 ($R^2 = 0.216^{***}$). 용존 유기탄소와 유효태 카드뮴의 함량간의 결정계수 값이 유기물 함량과 유효태 카드뮴의 함량간의 결정계수 값 보다 높은 것을 확인 할 수 있다 (Fig. 2(A)와 (B)). 이러한 결과는 토양 내 유효태 카드뮴의 함량은 유기물의 함량 보다는 용존 유기탄소의 함량과 관계가 높음을 의미한다. 유사한 결과로 Wong (2007) 등은 용존 유기탄소의 함량이 높은 유기물체재가 카드뮴의 유효도를 증가시킨다고 보고하였다. 따라서 토양 내 카드뮴의 유효도를 증가시키는데 용존 유기탄소의 함량이 주요한 인자가 될 수 있으며 토양 내 카드뮴의 유효도를 감소시키기 위해서는 용존 유기탄소의 함량이 적은 유기물체재를 선발하여 사용하는 것이 좋은 방법이 될 수 있을 것이다.

약용작물 내 카드뮴의 함량에 대한 영향 토양 내 유기물 함량에 따른 약용작물 내 카드뮴의 함량의 결과는 토양 내 유효태 카드뮴의 함량과 유사하게 나타났다. 토양 내 유기물의 함량이 증가할수록 약용작물 내 카드뮴의 함량은 증가하는 경향을 나타냈다 (Fig. 4(A)). 이러한 결과는 결과는 1 M NH_4OAc 로 침출 가능한 형태의 카드뮴이 약용작물 내 흡수된 카드뮴의 함량을 잘 설명한다고 판단할 수 있다. 본 연구에서 토양 내 1 M NH_4OAc 로 침출 가능한 카드뮴의 함량과 약용작물 내 흡수된 카드뮴의 함량은 고도의 정의 상관관계를 나타내었다 (Fig. 5). 다수의 관련 연구들에서도

1 M NH_4OAc 로 침출 가능한 카드뮴의 함량과 식물체 내 카드뮴의 함량 관련성이 높다고 보고하였다 (Bolan et al., 2003a; He and Singh, 1993; Hong et al., 2007; Van Ranst et al., 1999).

약용작물 내 흡수된 카드뮴의 함량은 토양 내 용존 유기탄소의 함량과 고도의 정의 관계를 나타내었다 (Fig. 4(B)). 유효태 카드뮴 함량의 결과와 마찬가지로 용존 유기탄소와 약용작물 내 카드뮴의 함량간의 결정계수 값이 유기물 함량과 약용작물 내 카드뮴의 함량간의 결정계수 값 보다 높은 것을 확인 할 수 있다 (Fig. 4 (A)와 (B)). 이러한 결과는 약용작물 내 흡수된 카드뮴의 함량은 유기물의 함량 보다는 용존 유기탄소의 함량과 관계가 높음을 의미한다. 용존 유기탄소와 복합체를 형성한 카드뮴 (Cd-DOC complex)은 식물체 뿌리에서 흡수될 때 세포벽의 지질이증막의 소수성기를 쉽게 통과할 수 있어 카드뮴 이온 (Cd^{2+}) 보다 쉽게 흡수

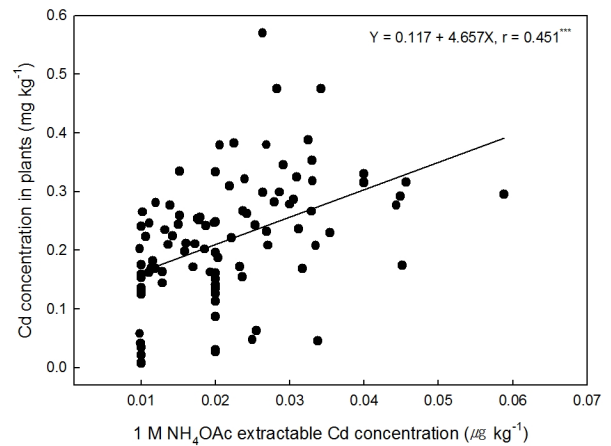


Fig. 5. Correlation between 1 M NH_4OAc extractable Cd concentration in soils and Cd concentration in medicinal plants (*, **, and * denote significance at $p < 0.05$, $p < 0.01$, and $p < 0.001$, respectively).**

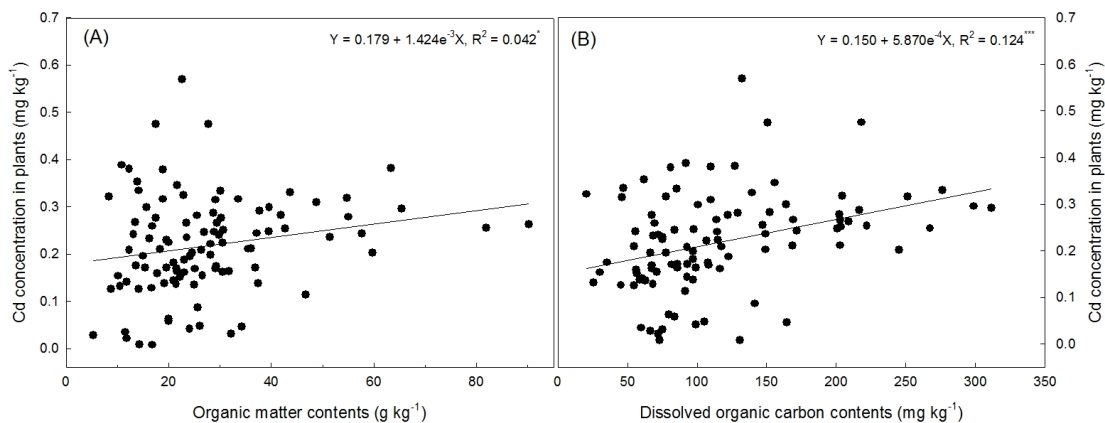


Fig. 4. The relationships between Cd concentration in medicinal plants and organic matter concentrations (A) and dissolved organic carbon concentrations (B) in soils collected from 102 medicinal plant fields (*, **, and * denote significance at $p < 0.05$, $p < 0.01$, and $p < 0.001$, respectively).**

Table 2. Linear regression equations for the estimation of Cd concentration in each medicinal plant derived from dissolved organic matter concentration in soils.

Plant species	n	Regression equation	R ²
<i>Angelica gigas</i> Nakai	17	Plant Cd ^a = 0.052 + 1.203 × 10 ⁻³ × DOC ^b	0.503 ^c
<i>Astragalus membranaceus</i> BUNGE	12	Plant Cd = 0.084 + 9.456 × 10 ⁻⁴ × DOC	0.904 ^{***}
<i>Codonopsis lanceolata</i>	22	Plant Cd = 0.220 + 2.145 × 10 ⁻⁴ × DOC	0.444 ^{***}
<i>Platycodon grandiflorum</i>	26	Plant Cd = 0.275 + 5.026 × 10 ⁻⁴ × DOC	0.405 ^{***}
<i>Rehmannia glutinosa</i>	25	Plant Cd = 0.095 + 7.660 × 10 ⁻⁴ × DOC	0.511 ^{***}

^a Plant Cd = Cadmium concentration in each medicinal plant.

^b DOC = Dissolved organic carbon concentration in soil.

^c *, **, and *** denote significance at $p < 0.05$, $p < 0.01$, and $p < 0.001$, respectively.

된다. 일부 연구에서는 토양 내 용존 유기탄소의 함량이 증가함에 따라 식물체 내 카드뮴의 흡수량이 증가한다고 보고하였다 (Antoniadis and Alloway, 2002).

토양 내 용존 유기탄소 함량과 각 약용작물 내 카드뮴 함량의 관계를 조사한 결과는 Table 2에 나타내었으며 모든 약용작물 내 카드뮴이 용존 유기탄소 함량과의 관계에서 정의 상관관계를 나타내었다. 가장 높은 상관관계를 나타낸 것은 황기 (*Astragalus membranaceus* BUNGE)로 회귀식은 Plant Cd (mg kg⁻¹) = 0.084 + 9.456 × 10⁻⁴ × DOC (mg kg⁻¹), R²=0.904^{***} 이었으며, 가장 낮은 상관관계를 나타낸 것은 도라지 (*Platycodon grandiflorum*)로 회귀식은 Plant Cd (mg kg⁻¹) = 0.275 + 5.026 × 10⁻⁴ × DOC (mg kg⁻¹), R²=0.405^{**}로 나타났다. 황기의 경우에 재배 토양의 특성이 부식질이 많은 곳에서 재배가 되므로 유기물에 의한 영향을 많이 받았을 것으로 판단된다. 반면에 도라지의 경우 가는 모래가 함께 섞여있고 배수가 좋은 곳에서 재배를 하므로 용존 유기탄소와 카드뮴 복합체가 지하수로 많이 용탈되어 영향을 상대적으로 적게 받았을 것으로 판단된다. 하지만 조사대상이 되었던 도라지 중 생약의 카드뮴 최대허용 기준치인 0.3 mg kg⁻¹을 초과하는 것도 확인할 수 있었으므로 도라지 재배 시 과도한 퇴비 사용은 오히려 식물체 내에 카드뮴을 축적시킬 수 있는 원인이 될 수도 있다.

Conclusions

토양 내 유기물의 함량과 용존 유기탄소의 함량이 증가함에 따라 식물이 이용 가능한 형태의 카드뮴의 함량이 유의하게 증가하였다. 그리고 토양과 마찬가지로 식물체 내 카드뮴의 함량 또한 유의하게 증가하는 경향을 나타냈다. 유기물의 사용에 따른 토양 내 카드뮴의 유효도 및 약용작물의 카드뮴 이용성은 토양 내 유기물의 함량 보다는 용존 유기탄소의 함량과 더욱 관계가 높은 것으로 조사되었다. 본 연구에서 토양 내 유기물 함량의 증가에 따른 약용작물 내 카드뮴의 흡수 증가는 유기물에서 기인된 용존 유기탄소

가 토양 내 카드뮴과 결합하여 복합체를 형성하고 카드뮴의 유효도를 증대시켜 발생된 것으로 판단된다. 약용작물 별로 용존 유기탄소 함량에 따른 약용작물 내 카드뮴 함량의 변화를 조사한 결과, 모든 약용작물에서 토양 내 용존 유기탄소의 함량이 증가함에 따라 유의하게 증가하는 경향을 나타내었다. 따라서 토양 내 용존 유기탄소의 함량은 약용작물 내 카드뮴의 함량에 영향을 미치는 주요한 인자로 판단되었다. 결론적으로 카드뮴 안전성 약용작물을 생산하기 위해서는 토양 내 용존 유기탄소 함량을 고려하여 유기물 제재를 사용하는 것이 필수적인 것으로 판단된다.

References

- Allison, L., W.B. Bollen, and C.D. Moodie. 1965. Total carbon. p.1346-1366. In: C.A. Black et al.(ed.). Methods of soil analysis. Part 2. Agron. Monogr. 9. ASA, Madison, WI, USA.
- Antoniadis, V. and B.J. Alloway. 2002. The role of dissolved organic carbon in the mobility of Cd, Ni and Zn in sewage sludge-amended soils. Environ Pollut, 117(3):515-521.
- Bolan, N.S., D.C., Adriano, P. Duraisamy, A. Mani, and K. Arulmozhiselvan. 2003a. Immobilization and phytoavailability of cadmium in variable charge soils. I. Effect of phosphate addition. Plant Soil, 250:83-94.
- Bolan, N.S., D.C. Adriano, P.A. Mani, and A. Duraisamy, 2003b. Immobilization and phytoavailability of cadmium in variable charge soils. II. Effect of lime addition. Plant Soil, 251:187-198.
- Bolan, N.S., D.C. Adriano, P. Duraisamy, and A. Mani. 2003c. Immobilization and phytoavailability of cadmium in variable charge soils. III. Effect of biosolid compost addition. Plant Soil, 256:231-241.
- He, Q.B. and B.R. Singh. 1993. Plant availability of cadmium in soils: I. Extractable cadmium in newly and long-term cultivated soils. Acta Agr Scand B-S P, 43:134-141.
- Hong, C.O., D.K. Lee, D.Y. Chung, and P.J. Kim. 2007. Liming effects on cadmium stabilization in upland soil

- affected by gold mining activity. *Arch Environ Con Tox*, 52:496-502.
- Hyun, H.N., A.C. Chang, D.R. Parker, and A.L. Page. 1998. Cadmium solubility and phytoavailability in sludge-treated soil: Effects of soil organic carbon. *Journal of Environmental Quality*, 27:329-334.
- Joshi B.C, G. Dwivedi, A. Powell, and M. Holscher. 1981. Immune complex nephritis in rats induced by long-term oral exposure to cadmium, *J. Comp. Path.* 91:11-15.
- Jung, B.G., J.W. Choi, E.S. Yun, J.H. Yoon, and Y.H. Kim. 2001. Monitoring on chemical properties of bench marked upland soils in Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 34:326-332.
- Jung, G.B., H.C. Kim, K.Y. Jung, B.K. Jung, and W.I. Kim. 1998. Heavy metal contents in upland soils and crops of Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 31:225-232.
- Jung S.J., S.D. Lee, S.J. Kim, S.A. Jo, N.H. Kim, H.J. Jung, H.S. Kim, and K.Y. Han, 2011. Monitoring of sulfur dioxide residue in commercial medicinal herbs in Seoul 2010. *J Food Hyg Safety*, 26:435-447.
- Kashem, M.A. and B.R. Singh. 2001. Metal availability in contaminated soils: I. Effects of flooding and organic matter on changes in Eh, pH and solubility of Cd, Ni and Zn. *Nutr Cycl Agroecosys*, 61:247-255.
- Kim, B.Y., K.S. Kim, J.S. Lee, and S.H. Yoo. 1994. Survey on the Natural Content of Heavy metal in Medicinal Herbs and Their Cultivated Soils in Korea, RDA, *J. Agri. Sci.* 36:310-320.
- Kim, K.R., G. Owens, R. Naidu, and K.H. Kim. 2007. Assessment Techniques of Heavy Metal Bioavailability in Soil - A critical review, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 40:311-325.
- Lee, M.K, J.S. Park, H.C. Lim, and H.S. Na. 2008. Determination of heavy metal contents in medicinal herb, *Korean J. Food Preserv.* 15:253-260.
- Lipoth, S.L. and J.J. Schoenau. 2007. Copper, zinc, and cadmium accumulation in two prairie soils and crops as influenced by repeated applications of manure. *J. Plant Nutrition Soil Sci.*, 170:378-386.
- Li, S., R. Liu, M. Wang, X. Wang, H. Shan, and H. Wang. 2006. Phytoavailability of cadmium to cherry-red radish in soils applied composted chicken or pig manure. *Geoderma*. 136:260-271.
- Liu, L., H. Chen, P. Cai, W. Liang, and Q. Huang. 2009. Immobilization and phytotoxicity of Cd in contaminated soil amended with chicken manure compost. *J Hazard Mater.* 163:563-567.
- MAFRA(Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs). 2013. 2012 Report of statistical data for production amount of special crops.
- McBride, M.B. 1994. *Environmental chemistry of soils.* Chapter 9. Trace and toxic elements in soils. p.308-341. Oxford University Press. Inc, NY, USA.
- Meers, E., G. Du Laing, V. Unamuno, A. Ruttens, J. Vangronsveld, F.M.G. Tack, and M.G. Verloo. 2007. Comparison of cadmium extractability from soils by commonly used single extraction protocols. *Geoderma*, 141:247-259.
- MFDS(Ministry of Food and Drug Safety). 2014. Publication of National Standard of Traditional Medicinal (Herbal and Botanical) Materials.
- Pinamonti, F.L.A.V.I.O., G.I.N.O. Stringari, F.L.A.V.I.A. Gasperi, and G.I.A.N.N.I. Zorzi. 1997. The use of compost: its effects on heavy metal levels in soil and plants. *Resour Conserv Recy.* 21:129-143.
- RDA(Rural Development Administration). 2013. Official Standard of Commercial Fertilizer.
- Ruby, M.W., A. Davis, T.E. Link, R. Schoof, R.L. Chaney, G.B. Freeman, and P. Bergstrom. 1993. Development of an in vitro screening test to evaluate the in vivo bio-accessibility of ingested mine-waste lead. *Environ Sci Technol.* 27:2870-2877.
- Symeonides, C. and S.G. McRae. 1977. The assessment of plant-available cadmium in soils, *J. Environ Qual.* 6:120-123.
- Ure, A.M., P.H. Quevauviller, H. Muntau, and B. Griepink. 1993. Speciation of heavy metals in soils and sediments. An account of the improvement and harmonization of extraction techniques undertaken under the auspices of the BCR of the Commission of the European Communities. *Int J Environ An Ch.* 51:135-151.
- Wong, J.W.C., K.L. Li, L.X. Zhou, and A. Selvam. 2007. The sorption of Cd and Zn by different soils in the presence of dissolved organic matter from sludge. *Geoderma*. 137: 310-317.
- Van Ranst, E., M. Verloo, A. Demeyer, and J.M. Pauwels. 1999. *Manual for the soil chemistry and fertility laboratory.* Ghent University, Faculty Agricultural and Applied Biological Sciences. pp.243.