

Effect of Rice Straw Compost on Cadmium Transfer and Metal-ions Distribution at Different Growth Stages of Soybean

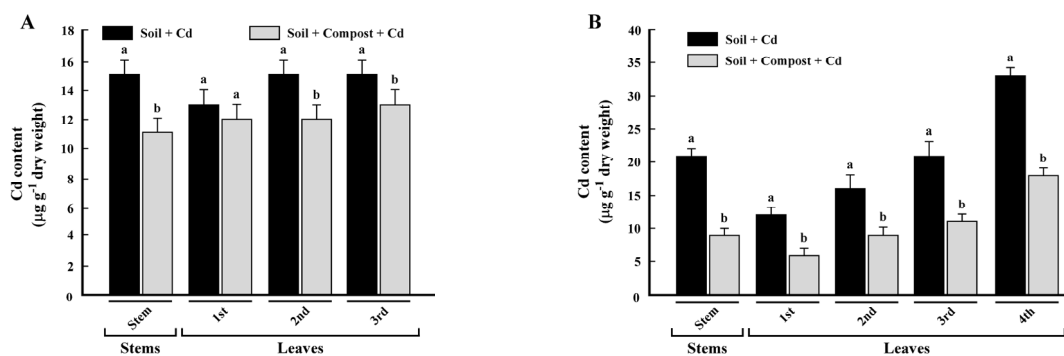
Ha-il Jung, Mi-Jin Chae, Myung-Suk Kong, Seong-Soo Kang, and Yoo-Hak Kim*

Division of Soil and Fertilizer, National Academy of Agricultural Science, RDA, Wanju, 55365, Republic of Korea

(Received: August 22 2016, Revised: October 13 2016, Accepted: November 7 2016)

In soil-to-plant transfer of heavy metals, the amount absorbed and accumulated varies depending on the environment conditions. The absorption rate of cadmium (Cd) in plants differs considerably depending on the bioavailability of Cd in the soil, while usage by various organic matters is also reported to affect absorption patterns. Therefore, this study aimed to identify the difference in the transfer of essential metal ions and Cd to various plant parts when rice straw compost was used to cultivate soybean (*Glycine max* L. cv. Daepung). In the two-leaf stage of soybean cultivated in a greenhouse, Cd was mixed in the soil, after which the Cd and essential metal ions contents, and physiological changes of soybean seedlings were studied on the 15th and 25th day. The Cd toxicity in the plant was reduced with the use of rice straw compost. Further, the Cd content varied with the plant part, and was higher in young leaves (3rd and 4th leaf) than in the stem. When analyzed by leaf age, the Cd transfer was highest in young leaves (3rd and 4th leaf), followed by mature leaves (1st and 2nd leaf). While there was no significant difference between plant tissues in the absorption rate of copper (Cu) and zinc (Zn) when rice straw compost was used against Cd toxicity, the absorption rate of manganese (Mn) and iron (Fe) showed a significant decline in both the control and rice straw compost treatment conditions, as well as a significant difference between leaf ages. Therefore, these results confirm that the use of rice straw compost against Cd toxicity is effective, and implies that the rate of Cd transfer in the soybean plant varies significantly with leaf age.

Key words: Cadmium, Metal-ions distribution, Rice straw compost, Soybean



Effects of the application of rice straw compost on Cd concentrations in stems, mature leaves (1st, 2nd leaf), and young leaves (3rd, 4th leaf) of soybean plants grown on the Cd-contaminated soils for 15 days (A) and 25 days (B).

*Corresponding author: Phone: +82632382437, Fax: +82632383822, E-mail: kim.yoohak@korea.kr

§Acknowledgement: This work was carried out with the support of "Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (Project No. PJ011953)" Rural Development Administration, Republic of Korea.

Introduction

중금속 오염은 환경오염의 증가와 더불어 인간의 건강에 악영향을 끼치고 있으며 산업화 및 도시화를 통하여 급속히 증가하고 있다. 이들의 중금속 중에서도 카드뮴은 생체 내에서 중요한 기능을 담당하는 효소 또는 단백질 등 생체대사를 교란시킴으로써 식물뿐만 아니라 인축에도 치명적인 독성을 유발하고 있다 (Jung et al., 2015; Mengel and Kirkby, 1978). 특히 식물에 있어 카드뮴 독성은 광합성 및 호흡작용의 저해, 식물체 내 이온 상호작용의 교란 등 대사 장애를 유발함으로써 전체적인 생육에 심각한 악영향을 초래한다 (Gayomba et al., 2013; Jung et al., 2015). 또한 카드뮴은 자연생태계에서 생물적 및 비생물적으로 분해되어 무독화 또는 안정화된 화합물의 형태로 변환되지 않고 자연생태계 내에 오랜 기간 존재하기 때문에 농경지와 농업용수를 오염시킬 뿐만 아니라 먹이사슬을 통해 생물체 내에 고농도로 축적됨으로써 식물 및 인체독성 피해를 야기하고 있다 (Galiulin et al., 2001; Jung et al., 2015; Nagajyoti et al., 2010). 식물의 카드뮴 흡수와 독성 반응은 토양 내에 존재하는 카드뮴 함량과 비례적으로 증가된다. 흡수된 카드뮴은 세포 내외 또는 일부조직에 축적되지만 일단 식물체 내로 과도하게 흡수되면, 흡수된 카드뮴에 의한 독성을 최소화시키기 위한 다양한 생리·생화학 적 무독화 기전을 통하여 독성을 극복하고자 한다 (Raven and Loeppert, 1997; Salt et al., 1995). 식물의 카드뮴 흡수율은 토양 중 카드뮴의 식물유효태 함량에 따라 큰 차이를 나타낼 뿐만 아니라 다양한 유기물 사용에 따라라도 흡수양상에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다. 특히 유기물의 사용은 양분공급 및 토양물리·화학적 개선 효과와 더불어 토양오질 내의 음전하를 증가시킴으로써 카드뮴을 포함한 중금속의 흡착능력이 증대되어 토양에서 식물체로의 중금속 흡수량을 감소시키는 효과가 있는 것으로 확인되었다 (Adriano, 1986; Han et al., 1997; Stevenson, 1994).

카드뮴의 식물체 내로의 흡수·이행은 단자엽과 쌍자엽 식물 간에도 상이한 차이를 보일 뿐만 아니라 식물체 내에서도 뿌리, 줄기, 잎, 그리고 종실의 조직부위별로도 큰 차이를 보인다. 이러한 흡수·이행성의 차이는 식물의 생육단계별 카드

뮴 운반수송체의 활성차이와 더불어 액포로의 격리수송체의 활성차이 또한 영향을 끼치는 것으로 보고되고 있다. 이는 식물종에 따라 그들의 조직 내로의 카드뮴 흡수·축적되는 식물체의 생리·생태적인 차이를 비롯하여 유전적인 차이에 기인하고 있음을 시사하는 것이고, 식물별 흡수 및 축적 형태와 필수금속이온들 간의 흡수양상과의 상관관계 및 생리·생태적인 연구가 수반되어야 할 것으로 판단된다 (Fergusson, 1990; Jung et al., 2015; Lee et al., 2012; Park et al., 2009).

따라서 본 연구에서는 카드뮴에 의한 식물독성 경감을 위한 기초 및 응용 자료를 얻기 위해 벧짚퇴비 사용에 따라 카드뮴이 콩 재배시 식물부위별 및 엽령별 식물전이와 필수금속이온의 항상성에 미치는 영향에 대해 평가하였다.

Materials and methods

토양시료 및 공시식물 본 연구에 사용한 토양은 국립농업과학원 내 시험포장에서 채취한 사양토를 사용하여 시험에 필요한 처리구별 토양 (무처리, 사양토; 벧짚퇴비처리, 사양토 + 벧짚퇴비; 카드뮴처리, 사양토 + 카드뮴; 벧짚퇴비-카드뮴처리, 사양토 + 벧짚퇴비 + 카드뮴)들을 조제한 후 사용하였다. 카드뮴의 토양혼화처리농도는 550 mg kg⁻¹ 농도의 인위적인 카드뮴 오염토양을 사양토에 희석하여 카드뮴처리구 (사양토 + 카드뮴, 18.2 mg kg⁻¹)와 벧짚퇴비-카드뮴처리구 (사양토 + 벧짚퇴비 + 카드뮴, 21.2 mg kg⁻¹)를 조제하였고, 완전히 부숙된 완숙벧짚퇴비는 국립농업과학원 작물별 시비처방 기준에 준하여 12 Mg ha⁻¹으로 토양에 혼화처리하였다 (Table 1).

온실조건 하에서 공시식물인 대풍콩을 원예용 상토가 충전된 규격육묘상 (8 × 16 tray)에 파종하고 균일하게 성장한 2엽기의 묘묘를 선별하여 각기 처리구별 포트 (가로 23 cm × 세로 17 cm × 높이 13 cm, 평균용적밀도 1.2 g/cm³, 2.5 L 처리토양 충전)에 2주씩을 이식하고, 주야간의 평균온도 30/25°C, 상대습도 60/80%, 그리고 광주기 14/10시간 및 콩 생육에 최적조건의 토양수분 (평균 33 kPa)을 유지하면서 15일 또는 25일 동안 실험을 실시하였다.

Table 1. Cd contents and chemical properties of the soils tested.

Treatment [†]	Cd content (mg kg ⁻¹)	pH (1:5)	EC (dS m ⁻¹)	OM (g kg ⁻¹)	Av. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	SiO ₂ (mg kg ⁻¹)	Exchangeable cations (cmol kg ⁻¹)				Extractable N (mg kg ⁻¹)	
							K	Ca	Mg	Na	NH ₄ -N	NO ₃ -N
Soil	0	7.4	0.5	6	38	209	0.2	13.9	3.5	0.4	14	10
Soil + Compost	0	7.6	0.9	12	55	266	0.3	15.0	3.9	0.6	14	4
Soil + Cd	18.2	7.3	0.5	7	45	224	0.2	15.5	4.0	0.3	15	5
Soil + Compost + Cd	21.2	7.7	0.8	14	56	268	0.3	14.7	3.9	0.5	17	6

[†]Soil, sandy loam; Compost, rice straw compost

생육변화 분석 카드뮴 독성에 대한 생육변화량을 분석하기 위하여, 2엽기에 토양 이식처리하고, 처리 후 15일 또는 25일에 식물체의 부위별 및 엽령별 생체중 및 건물중과 수분함량을 조사하였다.

토양의 화학성 및 카드뮴 분석 토양의 화학성과 카드뮴 분석은 국립농업과학원 토양 분석법에 준하여 실시하였다 (NAAS, 2011). 토양 카드뮴의 전함량 분석을 위하여 음지에서 풍건한 각기 처리별 토양시료를 고무망치로 잘게 부수어 2 mm 표준체를 통과한 시료는 토양화학성 분석에 이용하고, 다시 막사 사발로 간 후 0.15 mm 체를 통과한 시료는 카드뮴 분석에 사용하였다. 토양의 카드뮴 분석은 토양 시료를 왕수 (conc. HCl + HNO₃)로 150°C에서 2시간 분해한 후 유도결합플라즈마 원자방출분광기 (ICP-AES, AU/CINTRA 6, GBC Scientific, Australia)로 측정하였다. 본 시험에 사용한 카드뮴처리구 및 벧짚퇴비-카드뮴처리구 토양의 화학적 특성과 카드뮴 함량은 Table 1에 나타내었다.

식물체 내 카드뮴 및 필수금속이온 분석 식물체 분석은 국립농업과학원 식물체 분석법에 준하여 실시하였다 (NAAS, 2011). 카드뮴의 독성에 대한 식물전이와 필수금속이온 (Mn, Fe, Cu, Zn)의 항상성 변화를 확인하기 위하여, 대풍콩 2엽기에 벧짚퇴비와 카드뮴을 토양에 혼화처리하고, 15일과 25일 후에 식물체를 부위별 및 엽령별로 나누어 분리하여 건조한 후 분쇄하여 분석에 이용하였다. 식물체의 카드뮴 및 필수금속이온 (Mn, Fe, Cu, Zn) 함량 분석을 위하여 흑연블럭 방법을 이용하였고, 건조시료 0.5 g에 질산 14 mL을 넣고 산분해한 분해액을 50 mL 볼륨 플라스크에 부피를 맞춘 후 유도결합플라즈마 질량분석기 (ICP-MS, PerkinElmer Nexion

300X, Waltham, MA, USA)로 측정하였다.

통계처리 본 연구는 완전임의 배치 3반복으로 유리온실에서 수행하였고, 실험에서 얻은 결과들은 Excel software를 사용하여 평균과 표준편차를 작성하였다. 또한 통계처리는 Statistical Analysis Software (SAS ver. 9.2) 프로그램을 이용하여 처리간 분산분석을 실시하였다. 처리의 효과는 Fisher 최소유의차 검정 ($p=0.05$)을 통하여 유의성 유무를 분석하였다.

Results and Discussion

생육변화 분석 카드뮴은 필수금속이온 (Mn, Fe, Cu, Zn 등)을 보조인자로 함유한 단백질의 금속이온을 치환함으로써 중요한 단백질의 기능장애와 더불어 활성산소종 (reactive oxygen species, ROS)을 발생시킴으로써 세포 내에서 지질과산화작용을 야기한다. 이로 인한 세포막 파괴는 일차적으로 생물체량의 감소를 초래하고 최종적으로 세포를 고사하게 한다 (Gayomba et al., 2013; Jung et al., 2015; Paulose et al., 2013). 따라서 카드뮴 처리 15일과 25일 후, 식물부위별 및 엽령별 지상부 생체중 및 건물중과 수분함량의 변화를 조사하였다. 15일차의 지상부 생체중 및 건물중의 변화에 있어, 대조구인 카드뮴처리구와 벧짚퇴비-카드뮴처리구 모두에서 식물부위별 및 엽령별에 따른 유의적인 생체중과 건물중의 차이를 관찰할 수 없었다. 그렇지만 25일차의 경우, 벧짚퇴비-카드뮴처리구의 첫 번째 잎 (1st leaf)을 제외한 모든 잎 (2nd, 3rd, and 4th leaf), 줄기 및 식물체에서 생체중을 비롯한 건물중에서도 카드뮴처리구보다 유의적으로 높게 확인되었다. 그리고 식물부위별 생육변화에 있어 줄기와 어린 잎 (3rd and 4th leaf)에서 성숙잎 (1st and 2nd leaf)보다 높

Table 2. Effects of the application of rice straw compost on the fresh and dry weight of stems, mature leaves (1st, 2nd leaf), and young leaves (3rd, 4th leaf) in soybean plants grown on the Cd-contaminated soils applied with or without rice straw compost for 15 days and 25 days.

DAT [†]	Biomass (g)	Treatment [‡]	Stem	Mature leaves		Young leaves		Whole plant
				1st leaf	2nd leaf	3rd leaf	4th leaf	
15	Fresh weight	Soil + Cd	1.55a	0.74a	0.68a	0.58a	-	3.55a
		Soil + Compost + Cd	1.56a	0.73a	0.63a	0.59a	-	3.51a
	Dry weight	Soil + Cd	0.246a	0.129a	0.140a	0.113a	-	0.628a
		Soil + Compost + Cd	0.250a	0.130a	0.134a	0.111a	-	0.625a
25	Fresh weight	Soil + Cd	2.22b	0.68a	0.65b	0.62b	0.55b	4.72b
		Soil + Compost + Cd	2.47a	0.70a	0.70a	0.71a	0.62a	5.20a
	Dry weight	Soil + Cd	0.362b	0.100a	0.107b	0.109b	0.111b	0.789b
		Soil + Compost + Cd	0.416a	0.107a	0.118a	0.134a	0.128a	0.902a

[†]DAT indicates days after transplant on the soils.

[‡]Soil, sandy loam; Compost, rice straw compost

[§]Means within a column followed by the same letters are not significantly different at the 5% level according to Fisher's least significant difference (LSD) tests.

은 생체중과 건물중을 나타내었다. 비록 4엽기까지의 영양생장기간의 결과이지만 벧짚퇴비사용에 따른 콩 엽령 간 생체중과 건물중은 어린잎이 성숙잎보다 높게 나타났으며, 이 결과는 전체 식물체의 생체중 및 건물중의 변화로 이어짐을 확인할 수 있었다 (Table 2).

지상부 수분함량을 측정된 결과, 처리 25일차의 첫 번째 잎에서만 카드뮴처리구에서 벧짚퇴비-카드뮴처리구보다 높게 관찰되었을 뿐 나머지 모든 식물부위별 및 엽령 간에는 통계적인 차이를 나타내지 않았다. 또한 모든 처리 간에 동일하게 최적생육조건인 토양수분 (평균 33 kPa)을 유지하였음에도 불구하고 식물체의 수분함량을 측정된 결과에 있어서는 생육이 진전됨에 따라 성숙잎보다 어린잎에서 수분함량이 다소 감소됨을 확인할 수 있었다 (Fig. 1). 이는 카드뮴이 지하부에서 지상부로 이행될 때 카드뮴 독성으로 인하여 활성산소종이 발생하게 되고, 이로 인하여 도관조직에 손상을 줌으로써 지상부 생체중 및 건물중과 더불어 수분함량이 감소되는 것으로 판단된다 (Jung et al., 2015; Rodríguez-Serrano et

al., 2009).

식물체 내 카드뮴 함량 변화 벧짚퇴비사용에 따른 식물부위별 및 엽령별 카드뮴의 식물전이 정도를 산출하기 위하여 처리 15일과 25일에 카드뮴을 분석한 결과, 콩 이식전 처리별 카드뮴 함량에 있어 벧짚퇴비-카드뮴처리구 ($21.2 \text{ mg Cd kg}^{-1}$)에서 카드뮴 농도가 다소 높았음에도 불구하고 대조구인 카드뮴처리구 ($18.2 \text{ mg Cd kg}^{-1}$)에서 전체적으로 카드뮴의 식물전이율이 유의적으로 높게 나타남을 확인할 수 있었다. 또한 식물부위별 검출정도에 있어, 줄기보다 어린잎 (3rd, 4th leaf)에서 가장 높은 수준으로 카드뮴이 존재함을 확인할 수 있었다. 카드뮴의 식물전이 특성, 독성경감 및 식물정화에 중요한 시사점을 보이는 흥미로운 결과로써 카드뮴의 엽령 간 식물전이율 차이에 있어 성숙잎 (1st, 2nd leaf)에서 어린잎 (3rd, 4th leaf)의 순으로 점차 높은 수준으로 전이됨을 확인할 수 있었다 (Fig. 2). 또한 생물체량에 기반을 둔 식물부위별 카드뮴의 축적에 있어서도 벧짚퇴비시

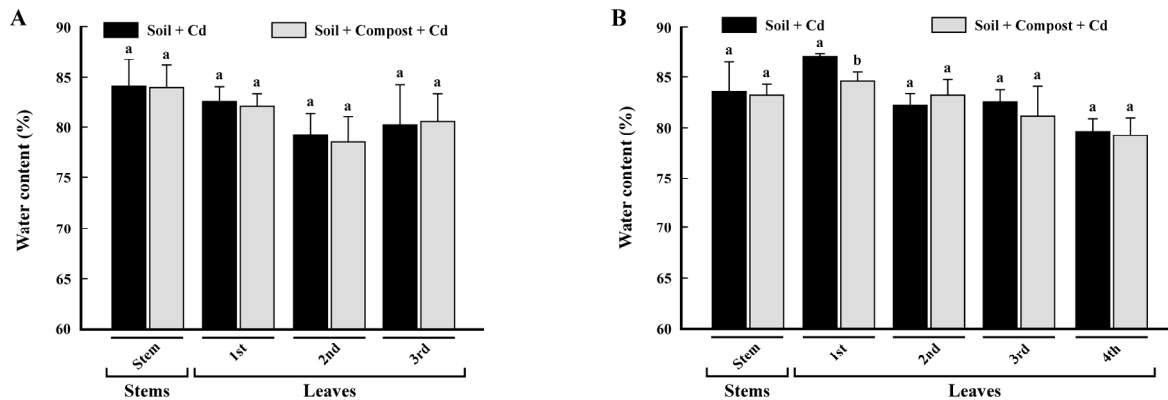


Fig. 1. Water content of stems, mature leaves (1st, 2nd leaf), and young leaves (3rd, 4th leaf) in soybean plants. Soybean plants were grown on the Cd-contaminated soils applied with or without rice straw compost for 15 days (A) and 25 days (B). Error bars indicate standard deviation (SD) of three replications. Means denoted by the same letters are not significantly different at the 5% level according to Fisher's least significant difference (LSD) tests.

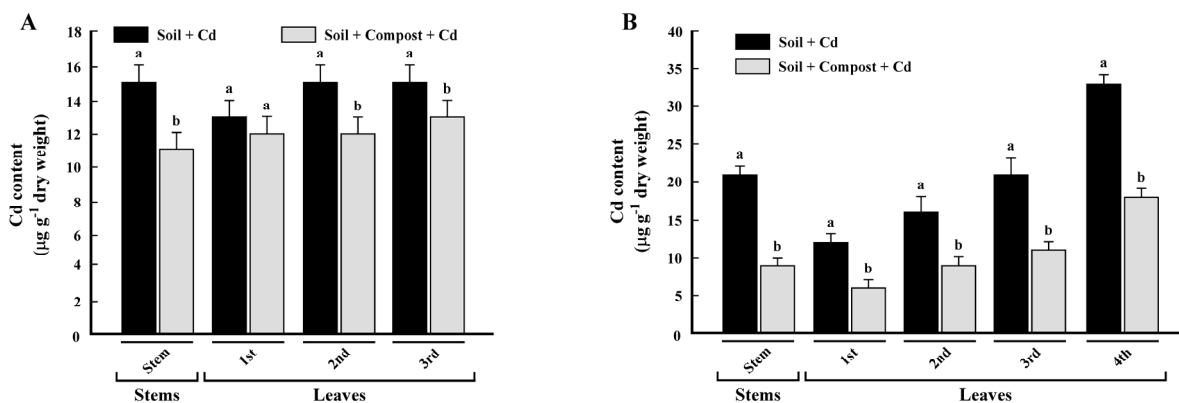


Fig. 2. Cd concentrations in stems, mature leaves (1st, 2nd leaf), and young leaves (3rd, 4th leaf) of soybean plants grown on the Cd-contaminated soils applied with or without rice straw compost for 15 days (A) and 25 days (B). Error bars indicate standard deviation (SD) of three replications. Means denoted by the same letters are not significantly different at the 5% level according to Fisher's least significant difference (LSD) tests.

용에 따라 카드뮴의 축적량이 감소됨을 확인할 수 있었다. 엽령 간의 축적량은 식물전이율과 유사한 경향으로 성숙잎 (1st, 2nd leaf)보다 어린잎 (3rd, 4th leaf)에서 높게 축적되었지만 식물부위별 축적량에 있어서는 줄기가 가장 많은 양이 축적됨을 확인할 수 있었다 (Table 3). 카드뮴의 식물체 내로의 흡수·이행은 단자엽과 쌍자엽 식물 간에도 상이한 차이를 보일 뿐만 아니라 식물체 내에서도 뿌리, 줄기, 잎, 그리고 종실 등의 식물부위별로도 큰 차이를 나타낸다. 이는 식물종에 따라 그들의 조직 내로의 카드뮴 흡수·축적되는 식물체의 생리·생태적인 차이를 비롯하여 식물생육단계별 카드뮴 운반수송체의 발현 차이에 기인하고 있음을 시사하는 것이며, 또한 다양한 유기물 사용에 따라서도 흡수양상에 영향을 미치는 것으로 판단된다 (Fergusson, 1990; Jung et al., 2015; Lee et al., 2012; Park et al., 2009; Ye et al., 2012). 특히 유기물의 사용은 양분공급 및 토양물리·화학적 개선 효과와 더불어 토양교질 내의 다양한 음전하를 증가시킴으로써 카드뮴의 흡착능력이 증대되어 토양에서 식물체로의 중금속 흡수량을 감소시키는 효과가 있는 것으로 생각된다 (Adriano, 1986; Han et al., 1997; Stevenson, 1994).

식물체 내 필수금속이온의 항상성 변화 중금속 이온들은 카드뮴 (Cd), 비소 (As), 납 (Pb), 니켈 (Ni), 크롬 (Cr), 알루미늄 (Al) 등의 비필수원소들과 구리 (Cu), 아연 (Zn), 철 (Fe), 망간 (Mn), 몰리브덴 (Mo) 및 코발트 (Co) 등의 필수원소들로 분류된다 (Hossain and Komatsu, 2013; Hossain et al., 2012; Sharma and Agrawal, 2005). 이 금속이온들 중에서 식물은 토양 매트릭스 (matrix) 및 교질에 흡착되어있는 필수금속이온 (Fe, Mn, Cu, Zn 등)을 뿌리를 통하여 흡수하고 성장, 발달 그리고 생식 등 다양한 생체대사와 생명유지에 이용한다 (DalCorso et al., 2014; Jung et al., 2015). 또한 식물은 이 금속이온들의 항상성을 적정수준으로 유지하기 위하여 금속이온 상호 간에 체계적이고 복잡한 흡수 및 이행 대사시스템을 구축하고 있다 (Hall, 2002; Jung et al., 2015;

Pasternak et al., 2005). 유기물 사용은 식물의 다양한 양분 공급원으로써 중요할 뿐만 아니라 토양교질 내에 다량의 음전하를 증가시킴으로써 카드뮴과 같은 중금속 이온들의 흡착능력 증대에 기여할 것으로 판단된다 (Adriano, 1986; Han et al., 1997; Stevenson, 1994).

망간, 철, 구리 및 아연은 식물의 대사에 있어 매우 중요한 효소 및 단백질 (plastocyanin, plastoquinone, cytochrome oxidase, Mn-SOD (superoxide dismutase), Fe-SOD, Cu/Zn-SOD 등)들의 보조인자로 사용되는 필수원소들로서, 이들은 광합성, 호흡작용, 산화환원조절 및 활성산소종의 무독화에 기여하는 항산화시스템과 콩과작물의 질소고정 등의 중요한 역할을 담당하는 금속이온들이다. 이들 이온의 항상성이 교란된다면 식물체는 급격한 광합성 감퇴, 산화환원의 불균형과 더불어 원활한 활성산소종의 소거에 지장을 초래할 것이므로 이들 이온들의 식물부위별 및 엽령별 변화는 생체 내의 생리·생화학적 대사와 식물독성경감 연구에 중요한 정보를 제공할 것이다 (Gayomba et al., 2013; Gopavajhula et al., 2013; Jung et al., 2015). 이러한 취지에 따라 비필수금속이온인 카드뮴의 독성에 있어, 벚짚퇴비사용에 따른 필수금속이온들의 항상성 변화를 분석하였다. 처리 후 25일차의 구리와 아연의 식물부위별 및 엽령별 항상성의 변화에 있어, 벚짚퇴비의 두 번째 잎과 벚짚퇴비-카드뮴처리구의 줄기에서만 구리함량에 차이가 있었던 반면 다른 처리구 간에서는 통계적인 차이가 없었다. 또한 동일처리구의 식물부위 및 엽령 간에는 유의적인 차이를 확인할 수 있었다. 그 흡수율은 줄기보다 잎에서 많이 검출되었고, 성숙잎 (1st, 2nd leaf)보다 어린잎 (3rd, 4th leaf)에서 더 많은 양이 전이됨을 확인하였으며, 특히 가장 어린잎인 4번째 잎에 구리와 아연이 가장 높게 존재함을 확인할 수 있었다. 그렇지만 구리 및 아연과 더불어 생체 내 산화·환원전위와 활성산소종의 무독화에 관련된 항산화대사에 중요한 역할을 담당하는 망간과 철의 항상성 변화에서는 카드뮴처리구 및 벚짚퇴비-카드뮴처리구 모두에서 유의적인 차이를 보였다. 식물부위별 망간의 항상성에 있

Table 3. Cd accumulation in stems, mature leaves (1st, 2nd leaf), and young leaves (3rd, 4th leaf) of soybean plants grown on the Cd-contaminated soils applied with or without rice straw compost for 15 days and 25 days.

DAT [†]	Treatment [‡]	Cd content in different tissues (µg)				
		Stem	Mature leaves		Young leaves	
			1st leaf	2nd leaf	3rd leaf	4th leaf
15	Soil + Cd	3.696a	1.679a	2.094a	1.690a	-
	Soil + Compost + Cd	2.751b	1.560a	1.602b	1.447a	-
25	Soil + Cd	7.592a	1.200a	1.712a	2.280a	3.678a
	Soil + Compost + Cd	3.746b	0.640b	1.058b	1.470b	2.306b

[†]DAT indicates days after transplant on the soils.

[‡]Soil, sandy loam; Compost, rice straw compost

[§]Means within a column followed by the same letters are not significantly different at the 5% level according to Fisher's least significant difference (LSD) tests.

Table 4. Essential metal ions (Mn, Fe, Cu, and Zn) concentrations in stems, mature leaves (1st, 2nd leaf), and young leaves (3rd, 4th leaf) of soybean plants grown on the Cd-contaminated soils applied with or without rice straw compost for 25 days.

Metal ion	Treatment	Metal content ($\mu\text{g g}^{-1}$ dry weight)				
		Stem	Mature leaves		Young leaves	
			1st leaf	2nd leaf	3rd leaf	4th leaf
Mn	Soil	59b	157a	129b	162b	317a
	Soil + Compost	60b	159a	149a	187a	347a
	Soil + Cd	63a	92b	96d	127c	256b
	Soil + Compost + Cd	65a	118b	120c	131c	243b
Fe	Soil	112a	174a	147a	126a	310a
	Soil + Compost	114a	172a	144a	117b	303a
	Soil + Cd	107b	169a	127b	115b	230b
	Soil + Compost + Cd	105b	160b	121b	106c	291a
Cu	Soil	53b	59a	57a	60a	70a
	Soil + Compost	54b	60a	52b	54a	65b
	Soil + Cd	54b	59a	59a	58a	65b
	Soil + Compost + Cd	66a	62a	56a	57a	62b
Zn	Soil	60a	87a	85a	101a	135a
	Soil + Compost	58a	86a	87a	96a	133a
	Soil + Cd	62a	85a	88a	94a	140a
	Soil + Compost + Cd	61a	88a	90a	94a	135a

[†]Soil, sandy loam; Compost, rice straw compost

[§]Means within a column followed by the same letters are not significantly different at the 5% level according to Fisher's least significant difference (LSD) tests.

어, 줄기를 제외한 모든 잎에서는 카드뮴의 무처리구보다 처리구에서 다소 낮게 나타났지만 벧짚퇴비 처리에 따른 유의적인 차이는 나타내지 않았다. 또한 땅간의 식물부위별 차이는 줄기, 성숙잎 그리고 어린잎의 순으로 높게 확인되었고 가장 어린잎인 4번째 잎에서 가장 많은 양이 전이됨을 확인하였다. 식물부위별 및 엽령별 철의 경우에 있어, 땅간과 유사한 경향으로 카드뮴처리구에서 거의 모두 낮게 나타났던 반면 가장 어린잎인 4번째 잎의 벧짚퇴비-카드뮴처리구에서 카드뮴처리구 보다 높게 전이됨을 확인할 수 있었다 (Table 4).

이상의 결과는 카드뮴의 독성에 있어, 벧짚퇴비의 사용에 따른 필수금속이온들의 항상성 교란은 일차적으로 화학적 특성이 비슷한 원자가에 기인한 길항작용의 결과로 생각되며, 더불어 그 원소들의 흡수를 담당하는 이온운반체들의 활성을 경쟁적으로 저해함으로써 항상성 변화에 영향을 끼치는 것으로 생각된다 (Gayomba et al., 2013; Jung et al., 2015). 또한 벧짚퇴비사용에 따른 토양교질 내의 음전하량을 증가시킴으로써 카드뮴의 흡착능력이 증대되어 토양에서 콩 식물체로의 전이를 감소시킴과 더불어 필수금속이온들의 항상성 교란을 경감된 것으로 판단된다 (Adriano, 1986; Han et al., 1997; Stevenson, 1994).

Conclusion

본 연구의 핵심적인 결과는 카드뮴이 지하부에서 지상부로 흡수·이행되어 카드뮴이 축적됨으로써 지상부 생물체량과 수분함량이 감소됨과 더불어 필수금속이온들의 항상성을 교란하여 총체적인 카드뮴 독성을 야기할 것으로 생각된다. 또한 카드뮴의 독성에 있어, 벧짚퇴비의 사용에 따른 토양교질 내의 다양한 음전하가 증가되고, 이로 인하여 카드뮴의 흡착능력이 향상됨으로써 토양에서 콩 식물체로의 전이를 감소시키고 더불어 필수금속이온들의 항상성 교란을 완화한 것으로 판단된다.

References

- Adriano, D.C. 1986. Trace elements in the terrestrial environment. Springer. Verlag.
- DalCorso, G., A. Manara, S. Piasentin, and A. Furini. 2014. Nutrient metal elements in plants. *Metallomics*. 6(10):1770-1788.
- Fergusson, J.E. 1990. The heavy elements: Chemistry, environmental impact and health effects. Pergamon Press.
- Galiulin, R.V., V.N. Bashkin, R.R. Galiulina, and P. Birch. 2001. A critical review: Protection from pollution by heavy metals phytoremediation of industrial wastewater. *Land Contamination*

- Reclamation. 9:349-358.
- Gayomba, S.R., H.I. Jung, J. Yan, J. Danku, M.A. Rutzke, M. Bernal, U. Krämer, L.V. Kochian, D.E. Salt, and O.K. Vatamaniuk. 2013. The CTR/COPT-dependent copper uptake and SPL7-dependent copper deficiency responses are required for basal cadmium tolerance in *A. thaliana*. *Metallomics*. 5(9):1262-1275.
- Gopavajhula, V.R., K.V. Chaitanya, P. Akbar Ali Khan, J.P. Shaik, P.N. Reddy, and M. Alanazi. 2013. Modeling and analysis of soybean (*Glycine max.* L) Cu/Zn, Mn and Fe superoxide dismutases. *Genet Mol Biol*. 36(2):225-236.
- Hall, J.L. 2002. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. *J. Exp. Bot*. 53:1-11.
- Han, K.W., J.Y. Cho, and Y.S. You. 1997. Several factors on growth of radish and absorption and translocation of chromium. *Korean J. Soil Sci. Fert*. 30(4):370-376.
- Hossain, Z. and S. Komatsu. 2013. Contribution of proteomic studies towards understanding plant heavy metal stress response. *Front. Plant Sci*. 3:310.
- Hossain, Z., M.Z. Nouri, and S. Komatsu. 2012. Plant cell organelle proteomics in response to abiotic stress. *J. Proteome Res*. 11:37-48.
- Jung, H.I., M.J. Chae, S.J. Kim, M.S. Kong, S.S. Kang, D.B. Lee, H.J. Ju, and Y.H. Kim. 2015. Effects of cadmium and arsenic on physiological responses and copper and zinc homeostasis of rice. *Korean J. Soil Sci. Fert*. 48(5):397-403.
- Lee, J.H., J.Y. Kim, W.R. Go, E.J. Jeong, A. Kunhikrishnan, G.B. Jung, D.H. Kim, and W.I. Kim. 2012. Current research trends for heavy metals of agricultural soils and crop uptake in Korea. *Korean J. Environ. Agric*. 31(1):75-95.
- Mengel, K. and E.A. Kirby. 1978. Principles of plant nutrition. 5th ed. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- NAAS. 2011. Soil and Plant Analyses. National Academy of Agricultural Science, RDA, Suwon, Korea.
- Nagajyoti, P.C., K.D. Lee, and T.V.M. Sreekanth. 2010. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. *Environ. Chem. Lett*. 8:199-216.
- Park, S.W., J.S. Yang, S.W. Ryu, D.Y. Kim, J.D. Shin, W.I. Kim, J.H. Choi, and S.L. Kim. 2009. Uptake and translocation of heavy metals to rice plant on paddy soils in "Top-rice" cultivation areas. *Korean J. Environ. Agric*. 28(2):131-138.
- Pasternak, T., V. Rudas, G. Potters, and M.A.K. Jansen. 2005. Morphogenic effects of abiotic stress: reorientation of growth in *Arabidopsis thaliana* seedlings. *Environ. Exp. Bot*. 53:299-314.
- Paulose, B., S. Chhikara, J. Coomey, H.I. Jung, O.K. Vatamaniuk, and O.P. Dhankher. 2013. A γ -glutamyl cyclotransferase protects *Arabidopsis* plants from heavy metal toxicity by recycling glutamate to maintain glutathione homeostasis. *Plant Cell*. 25(11):4580-4595.
- Raven, K.P. and R.H. Loeppert. 1997. Heavy metals in the environment: Trace element composition of fertilizers and soil amendments. *J. Environ. Qual*. 26:551-557.
- Rodríguez-Serrano, M., M.C. Romero-Puertas, D.M. Pazmiño, P.S. Testillano, M.C. Risueño, L.A. Del Río, and L.M. Sandalio. 2009. Cellular response of pea plants to cadmium toxicity: cross talk between reactive oxygen species, nitric oxide, and calcium. *Plant Physiol*. 150(1):229-243.
- Salt, D.E., M. Blaylock, N.P.B.A. Kumar, V. Dushenkov, B.D. Ensley, I. Chet, and I. Raskin. 1995. Phytoremediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. *Biotechnology*. 13:468-474.
- Sharma, R.K. and M. Agrawal. 2005. Biological effects of heavy metals: an overview. *J. Environ. Biol*. 26:301-313.
- Stevenson, F.G. 1994. Humus chemistry: Genesis, composition, reactions, 2nd Ed. John Wiley & Sons.
- Ye, X.X., Y.B. Ma, and B. Sun. 2012. Influence of soil type and genotype on Cd bioavailability and uptake by rice and implications for food safety. *J. Environ. Sci*. 24(9):1647-1654.