

Article

<https://doi.org/10.7745/KJSSF.2017.50.1.012>

pISSN : 0367-6315 eISSN : 2288-2162

Evaluation of Different Organic Materials in Reducing Cadmium Phytoavailability of Radish Grown in Contaminated Soil

Yong Gyun Kim, Hyeon Cheal Park, Keun Ki Kim, Sung Un Kim*, and Chang Oh Hong*

Department of Life Science & Environmental Biochemistry, Pusan National University, Miryang, 54063, South Korea

*Corresponding author: soilchem@pusan.ac.kr

ABSTRACT

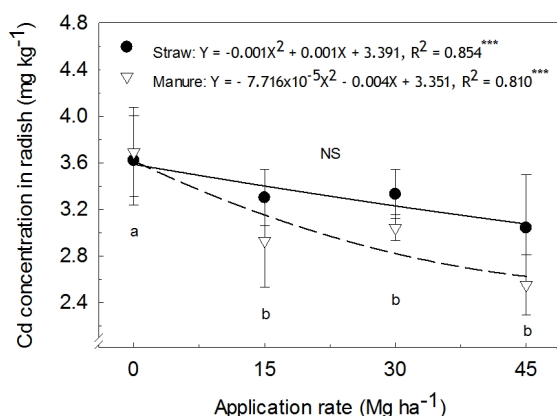
Received: January 24, 2017

Revised: February 8, 2017

Accepted: February 10, 2017

Various types of organic materials could affect differently immobilization of cadmium (Cd) and its uptake by plant grown in soil. Therefore, this study was conducted to evaluate effect of different organic materials in reducing Cd phytoextractability in contaminated arable soil. To do this, rice straw and composted manure were selected as organic materials and applied at the rate of 0, 15, 30, and 45 Mg ha⁻¹ in Cd contaminated arable soil with 6.5 mg kg⁻¹ of total Cd. Radish (*Raphanus sativa* L.) was seeded and grown for 50 days to evaluate Cd phytoavailability with different organic materials. Composted manure was more effective to decrease 1 M NH₄OAc extractable Cd concentration and increase pH of soil than rice straw. One M NH₄OAc extractable Cd concentration significantly decreased with increasing application rate of composted manure. Tendency of Cd uptake by radish plant with application of different organic materials was similar to that of 1 M NH₄OAc extractable Cd concentration and soil pH. Changes of soil pH with application of straw and composted might be one of factors to determine extractability and phytoavailability of Cd in this study. Radish yield significantly increased with up to 45 Mg ha⁻¹ of composted manure application but did not with straw application. In the view point of Cd phytoextractability and plant productivity, it is recommended to apply composted manure rather than straw in Cd contaminated arable soil.

Keywords: Cadmium, Immobilization, Manure, pH, Straw



Cadmium uptake by radish plant grown in soil amended with different rate of straw and composting manure at harvest time.



Introduction

카드뮴(Cd)으로 오염된 광산 토양 및 농경지 토양에서 Cd를 부동화시켜 토양을 복원하는 여러 연구들이 이루어졌으며, 해당 연구는 생물학적, 물리적, 화학적으로 다각도에서 연구가 진행되고 있다 (Anderson and siman, 1991; Angelova et al., 2004; Fässler et al., 2010; Kreutzer, 1995; Gray et al., 1999; Marchiol et al., 2007; Neugschwandtner et al., 2008; Srivastava et al., 2014; Vamerali et al., 2014). 현재까지 Cd 부동화에 관한 연구는 상당한 발전을 해왔으나, 각 기술의 현장 적용성은 늘 주요한 문제점이다. Cd과 같은 중금속의 유입이 가능한 농경지는 주로 산간지 또는 공업단지 주위에 위치하고 있어 토지가격이 낮고 개발가능성과 생산성이 매우 낮아 복원을 위해 경제적 타당성이 있는 복원방법이 필요하다.

유기물 제재는 작물의 생육 및 생식에 필요한 영양성분을 함유하고 있어 매년 농경지에 사용되고 있으며 가격이 저렴한 농업자재이므로 유기물을 이용한 화학적 안정화방법은 현장 적용성, 경제성, 지속성을 고려한 현실적인 복원방법으로 판단된다. 따라서 유기물을 투입하여 Cd을 부동화시키는 연구들이 많이 보고되었다 (Beesley et al., 2010; Bolan et al., 2003b; Brown et al., 1998; Koo and Chung, 2005; Liu et al., 2009). 그러나 이전의 연구들에서 보고된 바에 따르면 유기물제재의 종류에 따라 Cd을 부동화시키는 효과가 다른 것으로 조사되었다. 많은 연구에서 바이오솔리드, 계분퇴비, 부식, 바이오차 등의 유기물제재에 의해 토양 내 Cd의 용출성 및 식물이용성이 감소된다고 보고한 (Beesley et al., 2010; Bolan et al., 2003a; Brown et al., 1998; Liu et al., 2009) 반면에 일부 연구에서는 하수슬러지의 처리에 의해 Cd의 식물이용성이 증가되었으며 (Merrington and Madden, 2000) 우분퇴비에 의해서는 벼의 Cd 흡수 저감 효과를 볼 수 없었다고 보고하였다 (Kashem and Singh, 2001).

이상에서 언급한 바와 같이 유기물의 사용에 따른 토양 내 Cd의 부동화 효과는 유기물의 종류에 따라 다를 수 있다. 따라서 본 연구에서는 국내에서 유기물 제재로 많이 이용되고 있는 볏짚과 가축분퇴비를 유기물제재로 선발하여 두 제재의 처리에 따른 토양 내 Cd의 부동화 및 식물이용성 저감 효과를 비교 조사하고자 한다.

Materials and Methods

공시토양과 공시재료 본 연구를 수행하기 위해 경남 합천군 술곡리의 봉산광산 (128°01'N 34°37'E) 인근 밭 토양을 공시토양으로 선정하였다. 대상지역의 토양은 칠곡통에 속하는 토양이었으며 점토 6.1%, 미사 35% 모래 58.9%를 포함하는 사양토 (sandy loam)이었다. 자세한 공시토양의 화학적 특성은 Table 1에 나타냈다. 공시토양 내 조사된 중금속 Cd의 총함량은 6.5 mg kg^{-1} 으로 토양오염 우려기준 (4 mg kg^{-1})을 초과하는 것으로 나타났다 (환경부, 2012). 공시 유기물제재로는 볏짚과 가축분퇴비를 선발하였으며 볏짚은 부산대학교 부속농장에서 재배한 벼를 수확 후 얻은 볏짚을 자연건조 후 약 10 cm 길이로 절단하여 시험에 사용하였으며 가축분퇴비는 돈분과 우분을 원료로 제조되어 시중에 유통되고 있는 제품을 시험에 사용하였다. 공시 유기물제재의 이화학적 특성은 Table 2에 나타냈다.

현장시험 토양 내 Cd의 농도변화와 작물의 Cd 흡수특성을 조사하기 위해 2014년 9월 15일에 알타리무 (*Raphanus sativa* L.) 씨를 파종하여 50일간 재배를 실시한 후 토양 및 식물체 내 Cd농도를 조사하였다. 각 처리구 (각각 $2.5 \text{ m} \times 4 \text{ m}$, 10 m^2)는 3반복으로 난괴법에 따라 설치하였으며, 볏짚과 가축분퇴비를 알타리무의 퇴비 추천량 (15 Mg ha^{-1})의 0, 1, 2, 3배로 파종 2주전에 사용하였다. 모든 처리구에 질소 ($\text{N } 150 \text{ kg ha}^{-1}$), 인산 ($\text{P}_2\text{O}_5 \text{ } 78 \text{ kg ha}^{-1}$), 칼리 ($\text{K}_2\text{O } 81 \text{ kg ha}^{-1}$)

Table 1. Chemical properties of the soil before the test.

Items	Concentration	Warning criteria [†]
pH (1:5 with H ₂ O)	6.54	
Organic matter (g kg ⁻¹)	28.9	
Total nitrogen (g kg ⁻¹)	2.5	
Available phosphorus (mg kg ⁻¹)	101	
Cation exchange capacity (cmol _c kg ⁻¹)	9.10	
Exchangeable cation (cmol _c kg ⁻¹)		
K	0.17	
Ca	3.97	
Mg	0.87	
Na	0.03	
Total heavy metals (mg kg ⁻¹)		
Cd	6.5	4
Cu	44.9	150
Pb	56.4	200

[†] means warning criteria of each heavy metals established by Korean Soil Environmental Conservation Act.

Table 2. Chemical properties of organic materials used in this study.

Item	Straw	Composting manure
pH (1:5 with H ₂ O)	6.92	6.24
Total carbon (g kg ⁻¹)	353	391
Total nitrogen (g kg ⁻¹)	10.0	21.5
C/N	35.3	18.2

를 동일한 양으로 처리하였다.

토양 및 식물체 특성 분석 시험토양의 pH는 토양과 증류수의 비를 1:5로 침출하여 pH meter (starter 3000, Ohaus, USA)로 측정 하였으며, 유기물 함량은 Wakley and Black 방법 (Sparks, 1996)을 이용하여 분석하였다. 총질소 함량은 Kjeldahl 증류 방법을 이용하여 분석하였다. 치환성 양이온 K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺을 측정하기 위해 침출액 1 M NH₄-acetate를 pH 7.0으로 보정한 다음 침출하여 atomic absorption spectrometer (AAS, Perkin Elemer Model 3300, USA)로 측정하였다. 유효인산의 함량은 Lancaster method (RDA, 1988)을 이용하여 비색법으로 분석하였다.

유효태 카드뮴을 측정하기 위해 침출액 1 M NH₄-acetate을 토양:용액 비 1:5의 비로 1시간 침출한 후 여과하여 AAS로 측정하였다. 토양 내의 용존 유기탄소 함량은 토양시료 3 g에 증류수 30 ml을 넣고 침출 후 0.45 μm membrane filter로 여과 한 후 total organic carbon meter (TOC, analytic jena, Germany)를 이용하여 분석하였다.

수량은 수확 후 알타리무를 증류수로 세척하여 이물질들을 제거하고 드라이 오븐에서 70°C에서 72시간 동안 건조 후 건물중을 측정하여 평가하였다. 이후 건조 된 알타리무는 분쇄하여 Cd함량 측정을 위한 시료로 사용되었다. 건조된 시료 1 g을 채취하여 ternary solution으로 분해시킨 후 AAS로 Cd의 함량을 측정하였다.

통계처리 통계분석은 SAS 통계프로그램 (버전 9.2)을 이용하여 실시하였다 (SAS institute, 2006). 처리간의 차이를 비교하기 위하여 조사된 자료는 ANOVA 검증을 통하여 분석하였다. F-test 결과 값이 p < 0.05의 범위에서 유의

한 경우에만 최소유의차 검정 (LSD)을 실시하였다.

Results and Discussion

Cd의 용출성 본 연구에서 유기물제재의 종류와 사용량은 토양 내 유효태 Cd의 형태인 1 M NH₄OAc로 침출가능한 Cd의 함량변화에 유의하게 영향을 미쳤다 (Table 3). 또한 유기물제재의 종류와 사용량 간 교호작용도 유의한 것으로 조사되었다. 볏짚의 사용량을 증가시키에 따라 토양 내 1 M NH₄OAc로 침출가능한 Cd의 함량이 감소되는 결과를 나타내지 않았으나 가축분퇴비의 사용량을 증가시키에 따라 1 M NH₄OAc로 침출가능한 Cd의 함량이 유의적으로 감소하였다 (Fig. 1). 이러한 두 유기물제재 간 토양 내 Cd의 용출성에 미치는 영향이 다른 이유는 토양의 pH 변화와 연관될 수 있다. 토양에 사용되는 유기물제재들은 다양한 화합물을 포함하고 있으며 이러한 화합물 중 부식은 그 구조의 표면에 하이드록실 (OH), 카르복실기 (COOH) 등의 음하전을 가지고 있는 작용기들을 많이 포함하고 있다 (Plaster, 2002). 따라서 부식을 포함하고 있는 유기물제재를 토양에 사용하면 토양용액 내 수소이온 (H⁺)이 부식 표면의 음하전을 가지고 있는 작용기들에 흡착되어 토양의 pH는 증대하게 된다. 토양의 pH가 증대되면 Cd은 다음과 같은 기작을 통해 토양 내에서 부동화될 수 있다: 1) CdCO₃과 Cd(OH)₂와 같은 Cd광물형태로의 침전반응 (McBride,

Table 3. Analysis of variance (ANOVA) and probability values for soil properties, plant Cd uptake, and radish yield.

Parameter	Source of variation		
	Organic material (M)	Application rate (R)	M x R
df	1	3	3
1 M NH ₄ OAc extractable Cd	<0.001	<0.001	<0.001
Soil pH	<0.001	<0.001	<0.001
Dissolved organic carbon	<0.001	<0.001	<0.001
Cd concentration in radish	0.046	0.003	NS [†]
Radish yield	NS	0.021	NS

[†]NS: not significant.

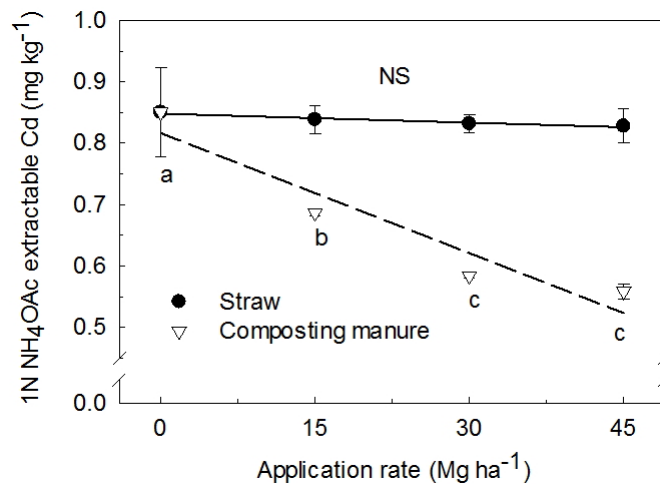


Fig. 1. Changes of 1 M NH₄OAc extractable Cd concentration in soil amended with different rate of straw and composting manure at harvest time.

1994; Naudy et al., 1994); 2) Cd²⁺의 토양고질 및 부식표면에 흡착 (Bolan et al., 2003b; Naidu et al., 1994); 3) Cd-유기물 복합체 형성 (Naidu et al., 1994).

본 연구에서 유기물제재의 종류와 사용량은 토양의 pH변화에 유의하게 영향을 미쳤다 (Table 3). 또한 유기물제재의 종류와 사용량 간 교호작용도 유의한 것으로 조사되었다. 볏짚과 가축분퇴비의 사용에 따른 수확기 토양의 pH변화는 토양 내 1 M NH₄OAc로 침출가능한 Cd의 함량변화와 유사한 경향으로 나타났다 (Fig. 1, 2). 볏짚의 사용량을 증가시키에 따라 토양의 pH는 약간 증가하는 경향을 나타내었으나 가축분퇴비의 사용량을 증가시키에 따라 토양의 pH는 더욱 증가하는 경향을 나타냈다. 볏짚의 사용량 증가에 따른 토양의 pH와 1 M NH₄OAc로 침출가능한 Cd함량 변화에서 특이한 점은 볏짚의 사용량 증가에 따라 토양의 pH는 증가 폭이 다소 적었지만 유의하게 증가하였다 (Fig. 2). 그러나 볏짚 사용량 증가에 따라 1 M NH₄OAc로 침출가능한 Cd의 함량은 유의하게 감소하지 않았다 (Fig. 1). 이러한 결과는 유기물제재의 사용에 따른 토양 내 용존유기탄소 (Dissolved organic carbon: DOC)함량 변화와 연관 지을 수 있다. 볏짚의 사용량을 증가시키에 따라 수확기 토양 내 DOC의 함량은 유의하게 증가하였으나 가축분퇴비의

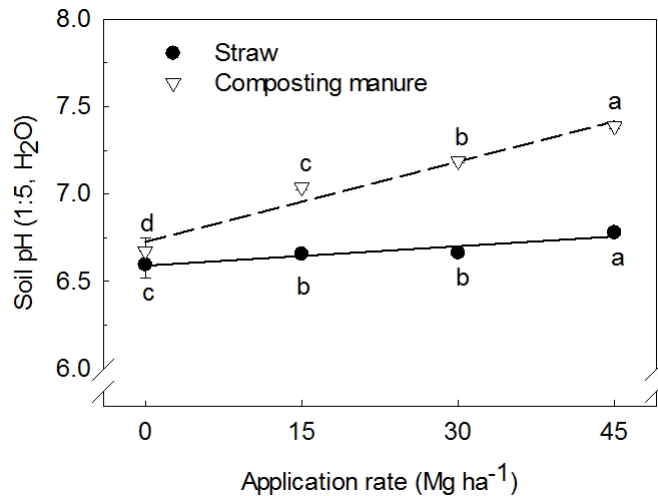


Fig. 2. Changes of pH of soil amended with different rate of straw and composting manure at harvest time.

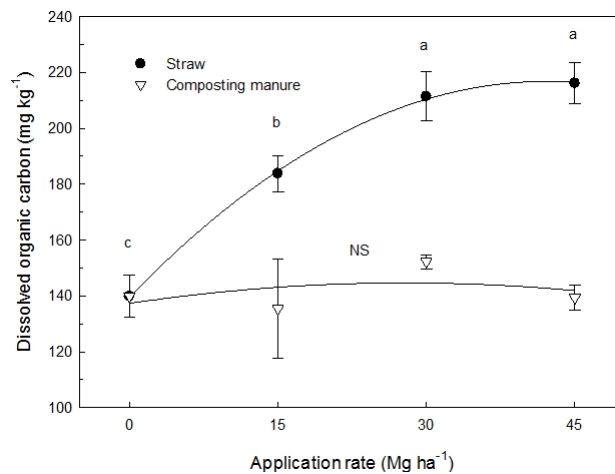


Fig. 3. Changes of dissolved organic carbon concentration in soil amended with different rate of straw and composting manure at harvest time.

사용량 증가에 따른 DOC의 함량 변화는 없었다 (Fig. 3). 토양 내 DOC는 Cd^{2+} 와 Cd-DOC형태의 복합체를 형성하여 수용성 형태의 Cd함량을 증대시켜 토양 유효태 Cd의 형태인 1 M NH_4OAc 로 침출가능한 Cd의 함량을 증대시킬 수 있다 (Antoniadis and Alloway, 2002; Kumar et al., 2013). 따라서 벧짚을 사용에 의한 토양 내 DOC 함량의 증가는 토양의 pH증대에 따른 Cd의 용출성 저감효과를 감소시키는 역할을 한 것으로 판단된다.

가축분퇴비의 사용이 토양의 pH를 증대시키고 이에 따라 1 M NH_4OAc 로 침출가능한 Cd의 함량을 감소시키는 효과가 벧짚의 사용에 비해 더욱 우수한것으로 판단된다. 이러한 효과에서 두 제재 간의 차이는 유기물제재의 부숙과정에서 기인된것으로 판단된다. 본 연구에 사용된 벧짚의 경우에는 부숙과정을 거치지 않았으나 가축분퇴비는 부숙과정을 거친 후 시중에 유통되고 있는 제품이었다. 퇴비에는 다양한 탄소화합물이 존재하며 부숙과정에서 DOC와 같은 저분자 형태의 탄소화합물은 분해되어 유실되고 안정한 형태의 부식물질이 많이 존재한다. 따라서 부숙과정을 거친 가축분퇴비는 부숙과정을 거치지 않은 벧짚에 비해 상대적으로 많은 양의 부식물질을 포함한다. 본 연구결과에서 나타난 바와 같이 부식물질을 상대적으로 많이 포함하고 있는 가축분퇴비가 벧짚에 비해 토양의 pH를 증가시키는 효과가 더욱 우수한것으로 조사되었다 (Fig. 2). 또한 부숙과정을 거치지 않은 벧짚은 사용 후 토양 내 미생물에 의한 분해 과정에 의해 Cd의 용출성을 증대시킬 수 있는 DOC의 함량을 증대시킨 것으로 판단된다 (Fig. 3).

Cd의 식물이용성 본 연구에서 유기물제재의 종류와 사용량은 수확기 알타리무 내 Cd의 농도에 유의하게 영향을 미쳤다 (Table 3). 벧짚과 가축분퇴비 두 유기물제재의 사용은 알타리무 내 Cd의 농도를 감소시키는 효과가 있는 것으로 조사되었으나 가축분퇴비의 사용이 벧짚의 사용보다 더욱 효과가 우수한 것으로 나타났다 (Fig. 4). 가축분퇴비의 사용량을 증가시키에 따라 알타리무 내 Cd의 함량은 유의적으로 감소하였으며 가축분퇴비를 최대 45 Mg ha^{-1} 으로 사용하였을 때 알타리무 내 Cd의 농도는 무처리 3.69 mg kg^{-1} 에서 2.55 mg kg^{-1} 로 약 30% 감소하는 결과를 나타냈다. 벧짚과 가축분퇴비의 사용에 따른 알타리무 내 Cd 농도의 변화 경향은 1 M NH_4OAc 로 침출가능한 Cd의 함량과 토양 pH 변화 경향과 유사하게 나타났다 (Fig. 1, 2, 4). 즉, 두 유기물제재의 사용에 따른 토양의 pH변화가 Cd의 식물이용성 변화에 영향을 미치는 주요한 원인 중의 하나인것으로 판단된다. 앞에서 언급한 바와 같이 유기물제재의 사용에 의한 토양의 pH증대는 토양 내 Cd의 용출성을 저감시키고 결과적으로 Cd의 식물이용성이 저감 된 것으로 판단된다.

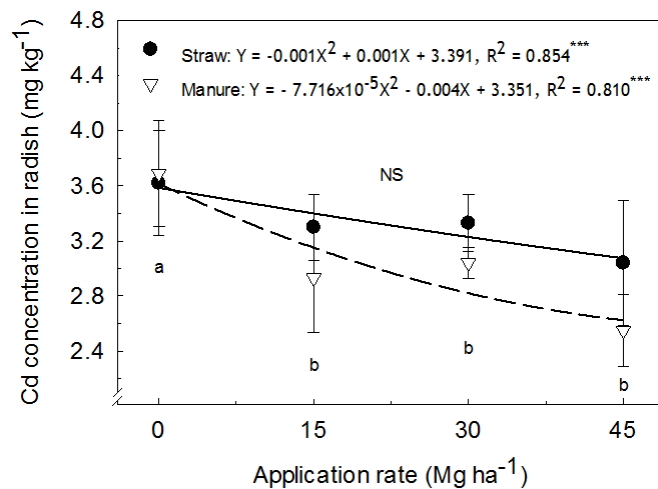


Fig. 4. Cadmium uptake by radish plant grown in soil amended with different rate of straw and composting manure at harvest time.

Cd오염 농경지에서 유기물제재를 이용한 Cd의 화학적 안정화 기술을 개발하는 것에 있어 고려하여야 할 중요한 사항 중의 하나는 작물의 생산성을 보장하는 것이다. 본 연구에서 유기물제재의 종류는 알타리무의 수량에 유의하게 영향을 미치지 않았으나 유기물제재의 사용량은 유의하게 영향을 미쳤다 (Table 3). 볏짚의 사용량 증가에 따른 알타리무의 수량증대는 없었으나 가축분퇴비의 사용량을 30 Mg ha⁻¹까지 사용하였을 때 무처리에 비해 수량의 증대가 있었으나 45 Mg ha⁻¹로 사용하였을 때 수량의 증대효과는 없었다 (Fig. 5). 가축분퇴비를 알타리무의 추천량인 15 Mg ha⁻¹로 사용하였을 때 최대수량인 22.1 Mg ha⁻¹를 얻을 수 있었다. 가축분퇴비의 사용에 의해 Cd의 식물이용성 저감효과와 생산성 증대효과 두가지를 동시에 얻기 위해서는 추천량인 15 Mg ha⁻¹을 사용하고 최대 30 Mg ha⁻¹을 넘지 않는 것이 적절한 것을 판단된다. 가축분퇴비를 15 Mg ha⁻¹로 사용하였을 때 알타리무 내 Cd의 함량은 무처리에 비해 약 21% 감소되는 효과가 있는 것으로 나타났다 (Fig. 4).

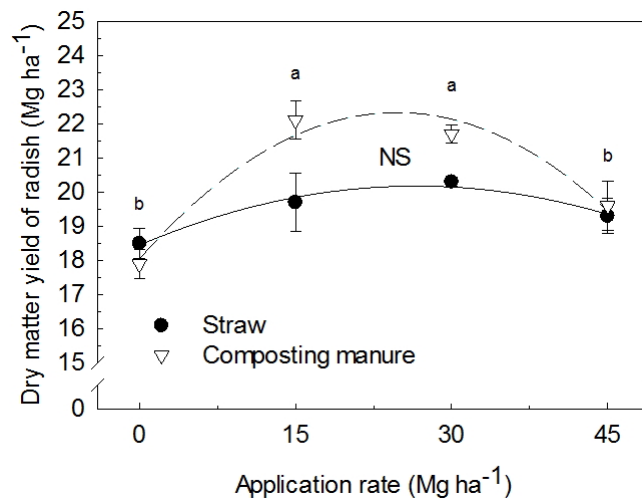


Fig. 5. Radish yield response to application rate of straw and composting manure at harvest time.

Conclusion

본 연구의 현장시험 결과는 볏짚과 가축분퇴비가 Cd의 용출성 및 식물이용성에 서로 다르게 영향을 미친다는 것을 명확하게 설명하고 있다. 가축분퇴비의 사용은 부숙과정을 거치지 않은 볏짚의 사용 보다 토양 내 유효태 Cd의 함량 감소 및 알타리무의 Cd 흡수 저감에 더욱 효과가 우수한 것으로 조사됐다. 가축분퇴비의 사용량을 증가시킴에 따라 알타리무의 Cd 흡수농도는 감소하는 경향을 나타냈다. Cd의 식물이용성 저감효과와 작물의 생산성 보장의 두 가지 측면을 고려해 볼 때 알타리무의 추천량인 15 Mg ha⁻¹ (<30 Mg ha⁻¹)로 사용하는 것이 최적의 Cd오염 농경지 토양 관리 방안으로 판단된다.

Acknowledgement

This work was supported by a 2-Year Research Grant of Pusan National University.

References

- Andersson, A. and G. Siman. 1991. Levels of Cd and some other trace elements in soils and crops as influenced by lime and fertilizer level. *Acta Agric, Scand.* 41(1):3-11.
- Angelova, V., R. Ivanova, V. Delibaltova, and K. Ivanov. 2004. Bio-accumulation and distribution of heavy metals in fibre crops (flax, cotton and hemp). *Ind Crops Prod.* 19(3):197-205.
- 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.* 117:515-521.
- Beesley, L., E. Moreno-Jiménez, and J.L. Gomez-Eyles. 2010. Effects of biochar and green waste compost amendments on mobility, bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in a multi-element polluted soil. *Environ pollut.* 158:2282-2287.
- Bolan, N.S., D.C. Adriano, P. Duraisamy, and A. Mani. 2003a. Immobilization and phytoavailability of cadmium in variable charge soils. III. Effect of biosolid compost addition. *Plant Soil.* 256:231-241.
- 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(2):187-198.
- Brown, S.L., R.L. Chaney, A.J. Scott, and J.A. Ryan. 1998. The phytoavailability of cadmium to lettuce in long-term biosolid-amended soil. *J Environ Qual.* 27:1071-1078.
- Fässler, E., B.H. Robinson, W. Stauffer, S.K. Gupta, A. Papritz, and R. Schulin. 2010. Phytomanagement of metal-contaminated agricultural land using sunflower, maize and tobacco. *Agric. Ecosyst. Environ.* 136(1):49-58.
- Gray, C.W., R.G. McLaren, A.H.C. Roberts, and L.M. Condon. 1999. Effect of soil pH on cadmium phytoavailability in some New Zealand soils. *N. Z. J. Crop Hortic. Sci.* 27:169-179.
- Kashem, M.A. and B.R. Singh. 2001. Metal availability in contaminated soil: II. Uptake of Cd, Ni, and Zn in rice plants grown under flooded culture with organic matter addition. *Nutr Cycl Agroecosys.* 61:257-266.
- Koo, B.J. and D.Y. Chung. 2005. Effect of biosolids on heavy metal bioavailability and organic acid production in rhizosphere of *Zea mays* L. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 38(4):173-179.
- Kreutzer, K. 1995. Effects of forest liming on soil processes. *Plant Soil.* 168-169:447-470.
- Kumar, R.R., B.J. Park, and J.Y. Cho. 2013. Application and Environmental Risks of Livestock Manure. *J Korean Soc Appl Biol Chem.* 56:497-503.
- Liu, L.N., H.S. Chen, P. Cai, W. Liang, and Q.Y. Huang. 2009. Immobilization and phytotoxicity of Cd in contaminated soil amended with chicken manure compost. *J. Hazard Mater.* 163:563-567.
- Marchiol, L., G. Fellet, D. Perosa, and G. Zerbi. 2007. Removal of trace metals by *Sorghum bicolor* and *Helianthus annuus* in a site polluted by industrial wastes: a field experience. *Plant Physiol Biochem.* 45(5):379-387.
- McBride, M.B. 1994. Environmental chemistry of soils, Chapter 9. Trace and toxic elements in soils, pp. 308-341, Oxford University Press, New York/Oxford, US government.
- Merrington, G. and C. Madden. 2000. Change in cadmium and zinc phytoavailability in agricultural soil after amendment with papermill sludge and biosolids. *Commun Soil Sci Plant Anal.* 31:759-776.
- Naidu, R., N.S. Bolan, R.S. Kookana, and K.G. Tiller. 1994. Ionic strength and pH effects on the adsorption of cadmium and the surface charge of soils. *Eur J Soil Sci.* 45:419-429.
- Neugschwandtner, R.W., P. Tlustoš, M. Komárek, and J. Száková. 2008. Phytoextraction of Pb and Cd from a contaminated agricultural soil using different EDTA application regimes: laboratory versus field scale measures of efficiency. *Geoderma.* 144(3):446-454.
- Sparks, D.L. 2003. Environmental Soil Chemistry. Academic Press, SD, USA.
- Srivastava, S., S. Sounderajan, A. Udas, and P. Suprasanna. 2014. Effect of combinations of aquatic plants (Hydrilla,

- Ceratophyllum, Eichhornia, Lemna and Wolffia) on arsenic removal in field conditions. *Ecol Eng.* 73:297-301.
- Vamerli, T., M. Bandiera, P. Lucchini, N.M. Dickinson, and G. Mosca. 2014. Long-term phytomanagement of metal-contaminated land with field crops: integrated remediation and biofortification. *Eur J Agron.* 53:56-66.