

우리나라 농경지 중금속 동태 및 작물흡수 연구동향

이지호,¹ 김지영,¹ 고우리,¹ 정은정,¹ Anitha Kunhikrishnan,¹ 정구복,² 김두호,¹ 김원일^{*}

¹국립농업과학원 유해화학과, ²국립농업과학원 기후변화생태과

Current research trends for heavy metals of agricultural soils and crop uptake in Korea

Ji-Ho Lee,¹ Ji-Young Kim,¹ Woo-Ri Go,¹ Eun-Jung Jeong,¹ Anitha Kunhikrishnan,¹ Goo-Bok Jung,² Doo-Ho Kim¹ and Won-Il Kim^{1*} (¹Chemical Safety Division, National Academy of Agricultural Science, Suwon 441-707, Korea, ²Climate Change & Agroecology Division, National Academy of Agricultural Science, Suwon 441-707, Korea)

Received: 09 March 2012 / Accepted: 23 March 2012

© 2012 The Korean Society of Environmental Agriculture

Abstract

BACKGROUND: Increase of heavy metals in agricultural ecosystem has become a social issue nationwide as it is related to public health. This review was performed to find out more systematic and integrated future researches on heavy metals using up to date articles published in the Korean journals related to agricultural environment.

METHODS AND RESULTS: Researches on heavy metals in agricultural soils and plant uptake were categorized by the establishment of criteria, analytical methods, monitoring, management of source, characteristics and behavior in soil, plant uptake, bioavailability affecting physico-chemical properties in soil, risk assessment and soil remediation. In the early 1990s, the monitoring for heavy metals in soil has been widely performed. Accumulation of heavy metals in contaminated soil and availability to plants has also attracted interests to study the soil remediation using various physico-chemical methods. The phytoavailability and phytotoxicity of heavy metals have been mainly studied to assess the safety of agro-products using risk assessment techniques in the 2000s.

CONCLUSION: Future direction of research on heavy metal in agricultural environment must be carried out by ensuring food safety and sustainability. A steady survey and proper management for polluted regions should be

continued. Law and regulation must be modified systematically. Furthermore, studies should expand on mitigation of heavy metal uptake by crops and remediation of polluted fields.

Key Words: Criteria, Heavy metals, Remediation, Risk assessment, Soil, Water

서론

환경에서 유해물질 중 하나인 중금속은 지구상에 미량으로 존재하면서 생명체에 들어가 축적되고 일정농도 이상에서 생태학적 피해를 주는 원소로 정의되며 비교적 분자량이 많고, 비중이 높은 원소로서 중금속(heavy metals), 미량원소(trace elements), 독성원소(toxic elements)로 표현된다. 여기에는 일반적으로 카드뮴(Cd), 크롬(Cr), 구리(Cu), 납(Pb), 수은(Hg), 니켈(Ni), 주석(Sn), 아연(Zn), 은(Ag), 코발트(Co), 철(Fe), 몰리브덴(Mo) 등 중금속과 비소(As), 알루미늄(Al), 셀레늄(Se) 등 경금속(light elements)이 포함된다(Kabata-Pendias, 1984 ;Adriano, 1986; Fergusson, 1990).

농업환경에서의 중금속에 관한 연구는 최초 1920-30년대에 작물의 미량원소에 대한 필요성과 결핍 연구로서 본격 시작되었으며, 1940년대 9개의 미량원소가 작물에 필수원소로 작용함과 구리의 결핍증상을 보고하였다. 2차 세계대전 후 급속한 산업화 및 도시화에 따른 중금속오염이 크게 증가하였으며 이에 따른 중금속 오염사례의 보고도 증가하였다. 1940년대 일본 진즈(Zinzu)강 유역 카드뮴 중독과 1950년대 일본 미나마타(Minamata)만 유기수은 중독이 그것이다. 1970

*교신저자(Corresponding author),

Phone: +82-31-290-0527; Fax: +82-31-290-0506;

E-mail: wikim721@korea.kr

년대 이르러 미국에서 화석연료의 사용 증가, 크레용 및 페인트 등에 의한 어린이 혈액중 납 함량의 증가, 일본의 카드뮴으로 오염된 쌀, 그리고 유해 중금속을 함유한 하수 슬러지의 농경지 유입에 따른 식품 연쇄계에서의 중금속에 대한 관심이 증가하였다(Kabata-Pendias, 1984 ;Adriano, 1986; Fergusson, 1990).

이에 국내에서도 1967년 농촌진흥청에서 벼농사에 사용되어진 유기수은제의 영향으로 백미중 수은함량을 조사하였고, 1971년 구리오염지 토양을 개량하기 위한 석회 및 규산물질 처리 효과를 확인한 이래 농업부에서 중금속에 대한 활발한 연구가 수행되었다(Jeong and Kim, 1971). 1999년 언론에 우리 국민의 유해물질 1일 섭취허용량(ADI: Acceptable Daily Intake)중 94%의 중금속과 5-15%의 농약을 섭취하는데, 유해물질의 경우 ADI의 10%가 넘으면 정밀조사 및 법적 규제가 요구되고, 30%가 넘으면 노약자는 위험하다고 보도된 바 있어 농산물의 안전성 문제는 식탁의 안전과 관련되어 시급한 환경문제이다. 그러나 농산물 안전관리에 대한 본질문제 인식부족과 대책수립에 미온적이고, 농산물 안전성 관련 연구 분야가 단편적, 지엽적, 산발적으로 수행되어 안전성 평가 기초 자료가 절대적으로 부족한 실정이다. 또한 토양 및 농산물 등 유해물질 잔류 허용기준 및 안전사용 기준이 설정되어있으나, 규제범위 및 농도 등의 보완이 필요하고, 토양오염 우려 및 대책 기준 지역의 선정 후 사후관리 역시 미흡하여 이에 대한 대책이 광범위하게 필요하다. 또한, 소비자의 농산물 안전성에 대한 관심이 고조됨과 함께 수입 농축산물의 안전성 문제가 제기되고 있으며 농축산물의 부가가치 향상의 주안점으로 안전성 확보가 절실히 요구되며 수출시장에서의 신뢰성 확보를 위하여 안전성 점검이 필수적이다. 국제적으로도 FAO/WHO(Codex기준), 유럽연합, 미 FDA 및 EPA등에서 유해물질 허용기준에 대하여 유해물질의 종류가 확대되고 기준이 강화되고 있는 실정이다.

따라서 본 총설에서는 중금속에 관한 토양오염, 작물의 흡수, 농산물 안전성, 위해성평가 연구와 더불어 모재별 자연환경량연구, 환경오염 지표생물 및 작물흡수 및 이동 모델링 관련 분야 연구 등이 연결된 보다 체계적이고 종합적인 연구를 수행하기 위한 방안을 모색하기 위하여 현재까지의 수행결과 자료 중 국내 농업관련 학회에 보고된 내용을 중심으로 정리하고자 한다.

농업환경 중금속 관련기준

우리나라 농업환경에 대한 중금속 관련 기준은 수질환경법(1990)에서 현미 중 카드뮴 함량이 1 mg/kg이상일 경우 수거 폐기하고, 토양 중 구리 및 비소함량이 각각 125와 15 mg/kg이상일 때 농산물 재배를 제한하였다. 이후 토양환경보전법(1996)에서 중금속 6성분 대한 토양오염 우려 및 대책 기준을 설정하였고 몇 차례의 개정을 통해 현재는 중금속 8성분으로 확대되었다. 농업용수에 대한 수질환경기준은 하천수 및 호소수에 대한 환경정책기본법(1990)과 지하수에 대한 지하수법(1995)으로 수질관리 목표치를 설정하고 관리하고

있다. 농업자재에 대한 중금속 관리는 비료관리법(1998) 및 사료관리법(2009)에 관리기준을 설정하여 현재 시행중이다.

농산물에 대한 중금속 기준은 농림부(1999)가 중금속 잔류허용 기준적용 지침으로 1차 국제기준(Codex)을 적용하였고, 식약청 고시(2000)로 쌀의 카드뮴 함량을 0.2 mg/kg으로 설정한 이후 24개 농산물에 대한 카드뮴과 납의 기준을 추가로 설정하여 관리되고 있었고, 최근 개별 농산물 중금속 기준을 8개 품목류(곡류, 서류, 콩류, 과실류, 엽채류, 엽경채류, 근채류, 파채류)로 분류하고 납과 카드뮴 기준(과실류 제외)을 적용하고 있다. 또한, 생약, 수축산물 및 식품에 대한 별도의 기준이 설정되어 있다.

농업환경 중금속 분석법

토양중 중금속 분석법에 대한 논의에서 Lee 등(1981)은 토양중의 가용성 카드뮴 정량을 위한 가장 효과적인 침출액을 결정하기 위하여 침출액별 가용성 카드뮴 함량과 현미중의 카드뮴 함량간의 상관으로 비교하여 1N-NH₄OAc (pH 7.0) 침출액이 가장 높은 상관을 보였으나 침출력이 낮음을 보고하였다. 이러한 침출액별 중금속 가용성 함량을 측정함은 토양중 중금속의 작물에 대한 유효도를 예측하는데 많은 정보를 제공한다. 1996년 토양환경보전법이 시행되고 카드뮴 등 6성분의 중금속 우려 및 대책기준이 설정되었으며, 이에 따른 토양오염공정시험기준에 의해 이 중 카드뮴 등 5성분은 용출시험방법으로, 수은은 전함량으로 분석법을 제시하였고, 2003년 토양 중 니켈 및 아연함량의 환경기준과 전함량 분석법이 추가되었다. Yun과 Kwon(1999)은 0.1N HCl 침출법과 산분해법의 분석법 비교 검토에서 사용목적에 적합한 전처리방법을 포함한 분석방법의 표준화를 제시한 바 있다. Jung 등(2000c, 2000d)은 광산인근 토양의 중금속 분석을 위한 4종의 단일침출법, 총함량 및 분획 분석법에서 침출액간의 침출정도를 비교하고, 이에 대한 작물의 유효도와 관련 여부를 검토하였고, 계속되는 연구에서 Jung 등(2005a)은 5가지로 다원화된 토양 중금속의 분석법을 전함량 분석으로 일원화하고 토양환경기준의 재설정을 언급하였다. Kim 등(2011d)은 토양오염 공정시험기준의 6가크롬에 대한 강알칼리 분석법이 추출에서 용출되는 유기물의 비색법 정량에 저해적인 영향으로 GFAAS 및 ICP의 이용을 제안하고 있다. 이러한 노력의 결과로 2010년 토양의 중금속항목의 기준 변경 및 분석절차 간소화 등을 위해 시험방법이 용출법에서 전함량 법으로 개정되어 활용되고 있다.

농산물에 대한 중금속 공정시험분석법은 식품공전의 유해성금속분석법으로 농산물의 산분해 및 건식회화 후 산추출법을 이용하여 정량하고 있다. 특히 Kim과 Lee(1995)는 현미중 카드뮴 분석방법을 기존의 습식 분해법과 더불어 회화온도 600°C의 건식 분해법을 제안하였다. 최근 ICP-MS 등 첨단 정량분석기기의 도입과 새로운 유해 중금속 분석 수요에 따른 분석법의 재정립이 진행되고 있다. Paik 등(2010c)은 메탄올-물 추출법을 이용하여 쌀의 비소화학종 4종을 분석하는 체계를 구축하였고, Choi 등(2010)은 다빈도, 다소비 20

개 농산물에 대한 비소화확증 분석과 국민의 식품별 섭취량을 고려한 위해성을 평가하였다. Kim 등(2011a)은 농산물 중금속 분석함에 있어 발생될 수 있는 측정불확도 및 오차 요인을 최소화하기 위하여 측정된 불확도 값, 표준시약의 소급성 유지, 시험기구의 교정 및 실험자의 숙련도 향상에 세심한 노력이 필요함을 언급하였다.

토양오염 모니터링과 오염원 관리

농경지 토양에 대한 중금속 연구는 1960~70년대 광산 및 제련소 인근 농경지에서의 작물의 피해원인을 파악하기 위한 사례연구와 토양 내 중금속에 의한 작물의 생육이 저해되는 정도를 파악하기 위한 피해도 기준설정 연구에 집중되었다. 농경지 중금속 오염에 관한 전국적인 모니터링은 1980년 Kim 등(1982)의 한국 논토양 및 현미 중 중금속의 함량에 관한 조사 연구를 시작으로 시설재배지 등 농경지 유형별로 조사(Kim *et al.*, 1993, 1995b; Jung *et al.*, 1996b, 1997, 1998b, 2004)가 계속되었고, 이는 우리나라 농경지 중금속의 자연함유량의 개념으로 조사된 내용이었다.

1996년 환경부의 토양환경보전법과 1997년 농림부의 친환경농업육성법에 의거하여 토양오염측정망 및 농업환경변동 조사사업으로서 우리나라 농경지중금속의 정부 차원의 관리를 목적으로 주기적인 모니터링 되고 있다. 농촌진흥청은 1999년부터 국책과제로 농업환경변동조사사업을 추진하여 논, 시설재배지, 밭, 과수원을 4년 1주기로 토양의 중금속 현황과 장기변동 사항을 모니터링하고 있으며, 환경적으로 중금속 노출에 취약한 생활하수 유입지, 광산, 공단 및 고속도로 인근 농경지에 대한 토양의 중금속 현황과 장기변동 사항을 모니터링을 수행하고 있다. Kim 등(2008d)은 전국 논토양의 중금속 함량의 장기적인 변화에서 비소, 니켈, 아연이 증가하는 경향이었으나, 카드뮴과 구리의 함량은 다소 감소하는 경향을 보고하였다. 그러나 경남지역의 조사 결과에서는 비소와 카드뮴에 대하여 다른 양상이 확인되었다(Lee *et al.*, 2010a). 특히 Jung 등(1997)은 시설재배지 및 동일 토양 재배 채소류 등의 중금속 함량을 조사하여 시설재배지 토양의 중금속 함량이 다른 영농형태별 토양의 중금속 함량보다 구리 및 아연에서 함량이 높게 나타나, 이는 불량재료로 만들어진 영농자재의 유입 및 그에 따른 농작물의 피해가 우려된다고 보고하였다. Lim 등(2008)은 제주도 화산회토양에서 니켈, 구리 및 아연의 자연함유량을 조사하여 니켈함량이 상대적으로 높은 원인이 암석의 특성과 관련이 있고 비경작지보다 경작지에서 구리 및 아연의 함량이 높은 원인은 인위적 요인으로 지적됨을 검토하였다. Kim 등(2010a)은 우리나라 토양의 크롬에 대한 분포특성을 고찰하여 모재와 토지이용에 따라 다양하게 분포하여 사문암과 화산회 토양이 화강암 유래 토양보다 높았고, 가용성 크롬함량은 산림토양보다 경작지에서 비교적 높음을 확인하였다.

일련의 농경지 중금속 모니터링은 토양오염의 가능성이 있는 도시 및 하천인근(Kim and Lee, 1983; Park *et al.*, 1983; Kim and Ryang, 1986; Lee and Choi, 1986a,

1986b; Kim *et al.*, 1992b, 1994b, 1994c, 1996c), 도로(Lee and Kim, 1991a, 1991b), 광산 및 공단인근(Lee and Song, 1985; Lee and Song, 1986; Kim *et al.*, 1992c, 1994a, 1998a, 1999b; Kim and Baek, 1994; Yoo *et al.*, 1983, 1996; Hong *et al.*, 2007a, 2007b; Yun *et al.*, 2010)의 농경지 및 농작물에 대한 조사가 오염 사례별로 이루어졌다. Kim과 Ryang(1985)은 제련소 인근 토양과 벼의 중금속 함량연구에서 납의 오염이 오염원과 밀접한 연관을 가지며 지상부 식물체 중의 중금속 함량과 현미 중 함량과 유의적인 정의 상관관을 보고하였다.

오염원에 의한 오염부하량 평가 연구가 꾸준히 수행되었는데, 농업환경에서 중금속 오염의 가장 큰 요인으로 광산활동에 의한 광미 및 침출수로부터 유래하는데, Yang 등(2001)은 농경지 중금속 주 오염원인 광미의 중금속 분획물을 조사하였고 오염도지수로 토양 및 물환경에 악영향을 미칠 잠재성을 지니고 있다고 판단하였다. Jung 등(2005a, 2005b)은 국내 폐금속광산 주변의 잔류광미에 대한 중금속 오염 특성을 보고하였고, Park 등(2006)은 광산인근에 산재한 광미로부터 용출되는 중금속의 특성을 batch와 column시험을 통하여 용출농도 및 용출속도에 대하여 산정하였다. 또한, Moon 등(2010b)은 주상모사(column)실험을 통하여 구룡광산 광미에서 용출되는 중금속의 특성과 pH와의 관련성을 검토하였다.

Kim 등(1994d, 1994e, 1994f)은 발전소 부산물 중의 하나인 석탄회시용이 농경지 토양의 중금속 함량에 미치는 영향을 조사하여 시용량 및 연용에 따른 토양내 중금속 함량 변화 및 쌀과 콩으로의 흡수이행에 관한 영향을 검토하여 석탄회 시용에 따른 중금속의 증가는 우리나라 작물의 천연부존함량의 표준편차 범위내로 증가하였으나 양질의 농산물 생산을 위해서는 석탄회의 농경지 이용은 고려되어야 할 사항으로 보고하였다. Chung 등(2002)은 부산물인 인산석고의 활용성을 제고하기 위하여 토양 시용시 용출될 가능성이 있는 유해 중금속에 대한 용출성이 낮은 것으로 확인하였다. 또한 석탄회 시용에 따른 토양 침투수중의 중금속 함량의 변화도 조사되었다(Kim *et al.*, 1995a, 1996b).

도시하수 슬러지(sludge)처리에 대한 연구(Kim *et al.*, 1990, 1992a; Lee *et al.*, 1997) 및 체지슬러지의 분해 특성 및 중금속의 변화(Lee *et al.*, 1996b)에 대한 연구도 수행되었다. Choi 등(1998a, 1998b)은 도시하수슬러지 처리에 의한 토양의 물리화학적 변화, 중금속 축적 및 작약 뿌리의 중금속 함량에 미치는 영향을 보고하였다. Kwon(2000)은 피혁폐기물 연용에 따른 토양 및 식물체내 크롬분포와 처리에 따른 생육저해를 보고하였다. Lim 등(2006)은 제약업종 부산물 및 화장품 제조업 폐수처리오니 처리 토양에서의 유기화합물 및 중금속의 영향을 평가하여 붕소, 코발트 등 타 미량원소에 대한 기준설정을 제안하였다.

안전 농산물 생산에 대한 국민의 관심 증대와 함께 농산물 생산에 투입되는 농업 자재의 안전성 확인을 위한 중금속 함량 조사가 활발히 진행되고 있다. 최근 사용량 크게 증가하고

있는 가축분뇨 퇴비(Kang, 2007), 액비(Kim *et al.*, 2004b; Lee *et al.*, 2011d) 및 상토(Kim *et al.*, 2003)에 대한 중금속 허용기준이 설정되어 있고 이들 자재에 대한 지속적인 함량조사가 수행되고 있다. Jung 등(1996a, 1998a)은 동일비료, 퇴비, 석회 및 규산질비료 등의 장기연용이 농토양과 현미중 중금속 함량에 미치는 영향을 조사하여 이들 비료에 의한 토양의 구리 및 아연함량의 증가와 이들 비료의 시용 후 토양중에 유기태, 황화물태 및 잔류태의 형태로 존재함을 확인하였다. 또한 농업자재로 구분되지 않으나 목재의 수명 연장을 위해 오랜 기간 사용되어진 크롬구리비소 계열의 목재 방부제인 CCA(Chromated Copper Arsenate)는 환경독성 금속류로서 구분되어 이들 설치지역의 중금속 분포 및 이동성을 조사하였고 PAN 지시약을 이용하여 현장에서 효율적인 검출 방법을 개발하였다(Abdelhafez *et al.*, 2009, 2010). 또한, Jung 등(2008)은 삼보광산 하류 수계의 계절별 수질변화와 오염도를 확인하여 오염된 농업용수의 영향을 평가하였다. Kim 등(2008a)은 화학비료 및 농약 등 농자재의 농경지 투여에 따른 비점오염원의 원단위 유출량과 부하량을 평가하여 특히 강우기에 용탈이나 유출에 대한 관리가 필요함을 언급하였다. Jung 등(2007a, 2011)은 수원과 태안지역 강우의 중금속 함량을 조사하여 강우에 의한 농경지의 중금속 부하량을 부하계수로서 평가하였고 강우기인 6~8월이 상대적으로 높았고, 또한 자연적 발생 유래원소인 철, 마그네슘보다 카드뮴 및 납이 부하계수가 높음을 확인하였다.

중금속의 토양내 행동특성

토양내 중금속은 물대기·토양 등의 다양한 매체를 통하여 이동하며, 그 형태가 기상 및 토양내 환경 등에 의해 물리·화학 및 생물학적 변화를 계속하면서 자연생태계에 영향을 미치고 있다. 국내·외적으로 중금속의 다양화 및 규제기준 강화에 따라 중금속의 종류 및 특성 파악은 오염지역에 대한 개량, 복원 및 관리 차원에서 중요한 영향인자가 되고 있다. Jung(2005a)은 오염토양의 효과적인 현장조사를 위한 방법론을 검토하였는데 오염토양을 효과적으로 진단하고 경제적인 복원을 위해 오염토양의 오염원, 오염정도, 인축에 대한 피해발생 유무, 오염물질의 이동경로 등을 올바르게 평가할 수 있는 방법을 제시하였다.

Kim 등(1983)은 카드뮴 화합물별 수도 흡수의 영향에서 용해도가 낮은 카드뮴 화합물의 처리구에서 토양중 가용성 카드뮴이 낮음을 보고하였다. Kim 등(1989c)은 도시하수 슬러지 장기 처리한 토양에서의 구리의 다양한 형태적 함량 변화의 원인이 되는 유효도를 예측하기 위하여 용매별로 추출되는 토양 구리함량을 비교 검토하였다. Hyun과 Yoo(1991)는 아연광산 주변 농토양에서 토양화학적 중금속의 형태와 그 분포에 미치는 영향을 조사하여 유기물함량이 높을 경우 구리의 유기복합태 함량의 증가함을 보였으나, 카드뮴, 납 및 아연 등에서는 유기복합태의 증가를 보이지 않았다. 또한 토양 pH가 높은 토양에서는 치환태 중금속의 함량이 낮음을 보였다. 광산 및 공단인근의 중금속 오염 농토양에서 단일 침출

액과 연속 침출법에 의해 각 중금속 함량의 경시적 변화와 형태 변화를 조사하였다(Yoo *et al.*, 1985, 1995; Yoo and Park, 1985a, 1985b; Jung *et al.*, 2005c). 토양에 의한 중금속 흡착에 관한 연구는 Yun(1998)에 의해 1997년까지의 연구결과가 정리되어 있다. Og 등(2003a)은 산화물에 대한 카드뮴의 흡착 특성을 모사하기 위하여 침철광(geothite)과 석영(quartz)에 대한 표면착물 모델을 적용하였다. 또한, Lee 등(2006)은 오염토양의 분획화를 통한 수종의 중금속 형태별 함량을 조사하였다.

Lee 등(2003)은 경작지 토양에서 카드뮴의 토양-물 간의 분배계수를 측정하여 토양 pH와 이론적으로 상관관계를 가지는 함수식을 보고하였다. Lee와 Doolittle(2006)은 탈착등온식을 이용하여 카드뮴 및 아연의 상호 관련성을 탐색하였다. Shin 등(1986)은 구리이온과 하수오니에서 유래된 수용성 유기물과의 착화합물이 팔면체 배위결합으로 형성됨을 전자스핀공명분광법(electron spin resonance)과 전위차적정법(potentiometric titration)으로 확인하였다. Lee 등(1995a)은 토양내 중금속의 행적을 구명하기 위하여 양이온 포화 제올라이트(zeolite)에의 중금속 흡착반응에 흡착 자유에너지의 변화량을 원소별로 계산되어 카드뮴 > 아연 > 구리 순으로 보고하였다. 또한 유사한 연구로서 철, 알루미늄 산화물에 대한 중금속 이온의 흡착도 조사되었다(Lee *et al.*, 1995b). Lee와 Goh(2000)는 하수오니에 의한 카드뮴 흡착의 속도론적 연구에서 흡착반응의 속도상수와 평형에서의 흡착량을 산정하였다. Chung과 Eum(2001)은 크롬산화에 따른 독성 및 유효도 변화에서 유기물 및 토양산도의 영향을 검토하였고, Lee(2001)는 토양의 카드뮴 흡착에 미치는 황화염 및 질산염의 영향을 보고하였다. Lee와 Cho(1999)는 하수오니 처리 석회질 토양에서의 카드뮴, 구리 및 아연의 이동특성을 용출곡선(elution curve)과 출현곡선(breakthrough curve)으로 비교 검토하였다.

Lim과 Kim(1983)은 농토양 카드뮴의 형태별 함량을 구분하였고 이들의 분포와 현미중 카드뮴 함량과의 관계 연구에서 카드뮴의 형태별 함량은 토양 pH 및 유기물함량에 영향을 받으며 현미중 카드뮴 함량은 유기태 카드뮴과 가장 높은 상관을 보였다. Yang 등(1995)은 중금속에 의한 토양오염을 화학적으로 평가하기 위하여 토양을 중금속으로 오염시킨 후 토양용액을 추출하여 이온강도 및 이온농도 등을 분석하였다. 이는 중금속의 생물 유효도 및 독성을 평가할 수 있는 자료로 활용된다. Jung 등(2001)은 폐광산 인근 농토양 중 중금속의 수직분포 특성을 조사하여 용탈에 의한 지하이동 연구의 필요성을 보고하였다. 또한 Seo 등(2010)은 폐 아연광산인근 농토양과 밭토양의 비소 분포 및 이동양상이 물의 영향으로 농토양의 경우 공극을 통한 집단류의 영향으로, 밭의 경우 흡탈착 및 침전 등의 영향으로 차이가 있음을 확인하였다. Kim 등(2010e)은 시설재배지 토양에서 구리와 아연의 형태별 함량을 조사하여 잠재적 이동태 및 이동태로 구분하였고 이에 대한 토양 pH의 영향을 확인하였다.

작물에 의한 중금속 흡수

자연에 있어서 작물은 먹이사슬의 최하층부 시작 부분으로서 뿌리 조직을 통하여 토양으로부터 수분과 양분을 흡수하여 성장하고 인간을 비롯한 동물에게 유용한 식량을 공급한다. 더불어 중금속은 토양 중 식물 영양성분과 함께 흡수되어 작물조직에 축적되고 작물에 생육 피해를 보이고 나아가 인체에 축적되어 만성적인 위해성을 나타낸다.

농업환경의 중금속오염에 대한 농작물로의 흡수이행에 관한 초기연구는 광산폐수나 공단폐수에 의한 농작물의 피해 원인조사, 생육에 미치는 영향, 유해농도를 규명하는데 있었다. 또한 각종 유해물질에 대한 농작물의 피해증상이 조사되었고, 유해물질 농도에 따른 정조수량의 5%의 유의적 감소농도를 농작물 피해농도로 규정하였고, 이러한 피해도 기준은 농업용수 및 농경지의 환경기준을 설정하는데 기초 자료로 활용되었다. 그러나 이들 작물의 생육피해농도는 식품의 안전성을 고려한 기준을 크게 상회하여, 즉 작물에서 피해가 관찰되는 농도에서는 식품으로서의 가치가 현저히 감소되므로 앞으로의 농업환경 기준에서는 생육피해에 따른 기준설정보다는 식품의 안전성을 고려한 농산물의 중금속 기준이 우선되어야 한다고 사료된다.

중금속의 작물체내로의 흡수 및 반응기작은 중금속 종류와 작물의 종류에 따라 다양하다. 작물의 종류에 따른 중금속의 흡수 이행은 작물 고유의 생리학적 메카니즘의 다양성으로 크게 구별되기 때문이다. Fergusson(1990)은 작물의 종류에 따라 원소별로 상대적인 흡수능을 조사하였다. 작물에 따라 특이한 원소를 많이 흡수함을 알 수 있고, 비교적 상추에서는 모든 원소의 흡수가 높은 반면, 쌀에서는 흡수가 낮음을 보였다. 작물의 줄기, 종실, 잎, 및 뿌리의 부위별로 또한 작물의 품종에 따라 그들의 조직 내에 중금속을 흡수하고 축적하는 능력이 원소별로 크게 차이를 보였다.

카드뮴은 작물에 불필요한 원소로서 토양에 유효태로 존재할 때 뿌리를 통해 쉽게 흡수되어 작물체 내에 축적된다. Yoo와 Park(1985a, 1985b)은 현미중 중금속 함량예측을 위하여 침출액에 따른 토양중 카드뮴, 아연, 납의 침출성을 비교하여 토양의 화학성과 쌀의 흡수와의 상관관계를 조사하였다. Kim 등(2008e)은 논토양의 카드뮴 존재형태 중 치환태, Fe-Mn 결합환원태 및 탄산염 결합태가 쌀로의 흡수 이행에 관련이 있음을 보고하였다. Yun 등(2008)은 토양과 콩과 고추 등 작물체의 카드뮴 안전동위체 존재비를 이용하여 식물 흡수 정도를 파악하여 토양과 식물계에서의 카드뮴의 이동을 해석하였다. Jung 등(2006, 2007b)은 복합적으로 오염된 공단인근 토양내 중금속의 존재형태와 미나리 중 함량과의 관계로서 흡수 이행성을 평가하였다.

비소는 작물에게 불필요한 유해원소로 화학 결합형태가 유사한 인(P)과 같은 운반체에 의해서 뿌리로 흡수되는데 5가의 비산태가 3가의 아비산태보다 더 용이하게 흡수되는 반면, 독성은 아비산태가 강하다. Kim 등(2010d)은 논토양의 비소의 존재형태 중 무정형 및 비결정형 철/알루미늄 수산화물형태가 기존의 유효도를 추정하는 1 M-HCl 침출성 함량

과 쌀로의 흡수 이행에 관련이 있음을 보고하였다.

크롬은 작물에 불필요한 원소로 독성을 가지나 동물에는 필수 미량원소이다. 하지만 많은 양이 축적되면 발암물질로 작용한다. 작물에 대한 독성은 비소와 같이 그 형태에 따라 다르며 6가크롬이 가장 강하고, 3가크롬, 산화크롬 순으로 약하다. 토양중 3가크롬은 강산성의 토양에서 약간의 이동성을 보이나 일반적인 Eh나 pH 5.5의 약산성의 토양에서는 거의 침전의 상태를 보인다. 6가크롬은 대단히 불안정하나, 3가크롬보다 용해도가 높아 작물에 이동하여 해를 준다. 또한 6가크롬은 담수 하에서 3가크롬으로 쉽게 환원되어 해가 줄어든다. 크롬은 카드뮴과 달리 지상부로의 이행량이 적어 종실에서는 거의 검출되지 않으나 지하부를 식용으로 하는 작물에서는 검출된다. Jeong(1977)은 크롬에 의한 배추의 질소, 인, 칼슘 등 필수양분함량의 감소 등 생육피해와 석회 시용에 따른 피해 저감을 보고하였다.

납은 작물의 뿌리를 통해 수동적으로 흡수되거나 줄기로의 전이는 제한적이다. 작물에서 납은 자연적인 킬레이트, pyro-와 ortho-phosphate형태로 존재한다. 납에 의한 작물의 피해는 타 중금속에 비해 상당히 덜 하다. Kim 등(2009b)은 납에 의해 유도되는 작물 뿌리의 유기산 배출과 구연산이 뿌리에서의 납 흡수를 증가시킨다는 보고를 하였고, 뿌리에서 흡수된 납의 줄기로의 전이가 해바라기와 카놀라에서 잦아 차이가 있음을 설명하였다.

토양내 중금속이 작물체로 흡수 이행되는 정도는 토양의 특성에 따라 크게 다르다. 작물의 중금속 흡수에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 토양중 중금속 함량이다. 대부분 중금속속에서 토양중 중금속 함량이 증가함으로서 작물내 중금속 함량이 증가한다. Adriano(1986)는 카드뮴, 비소, 수은 등에서 토양과 작물중 함량에 정의 상관성이 있음을 보이고, 몇 개의 중금속속에서 토양중 일정 농도이상에서 증가를 멈추고 감소하는 경향도 보였다. 작물체의 중금속에 대한 흡수와 이동성을 고려하여 생물학적 흡수계수(BAC, Biological Absorption Coefficient) 또는 생물농축계수(BCF, Bioconcentration Factor)로도 사용되고 있는데 이는 식물체내 중금속 함량을 토양내의 중금속 함량으로 나눈 값으로 토양으로부터 식물로 이동하는 중금속의 상대적인 흡수비를 의미한다. Park 등(2009)은 논토양 중 잔류중금속의 비 흡수이행 연구에서 비의 중금속별 생물학적 흡수계수가 카드뮴, 수은, 구리가 높은 반면 납과 비소는 낮은 경향을 보였는데 이는 기존의 보고와 유사한 결과를 얻었으나 이 당시 우리나라 토양의 중금속 분석법이 0.1N HCl 침출성 함량으로 얻어진 결과로서 단순히 원소간의 차이만 확인할 수 있는 것으로 사료된다. Kim 등(unpublished data)의 결과에서 토양의 전함량에 대한 쌀로의 생물농축계수가 아연, 구리 및 크롬이 높은 반면 납과 비소가 낮게 조사되었고 또한, 고추로의 생물농축계수는 구리, 아연, 및 카드뮴이 높은 반면 납과 비소가 낮게 나타나 작물 종류에 따른 차이가 확인되었다. 이에 따라 계속되는 연구 수행으로 작물군의 종류를 확대하여 이들의 생물농축계수를 확인하고, 이를 이용한 환경위해성 평가, 인체노출 및 독성평가

가 수반되어야 할 것이다.

Kim 등(1989a)은 사과 과수원 토양의 중금속함량과 잎의 중금속 함량과의 관계를 연구하였고, Jung 등(1996b)은 약용작물 재배토양의 중금속 함량과 생약중의 함량간의 유의성을 검토하였고 토성에 따른 비교 분석을 조사하였다. 또한 Lim 등(2009)은 중금속의 형태별 함량이 다른 토양에서 청경채를 재배하여 아연과 구리는 뿌리에서 흡수되어 지상부로 이동되고 니켈의 경우 지상부에서 검출되지 않아 중금속의 종류에 따라 이동성의 차이가 있음을 확인하였다.

작물의 중금속 흡수에 미치는 농업환경 영향 연구

작물의 중금속 흡수에 미치는 농업환경으로는 크게 토양의 물리화학적 특성과 작물 경작 방법으로 나눌 수 있다. 토양의 물리화학적 특성의 차이로는 토양수분, 토양온도, 토양산도, 점토, 양이온치환용량, 인산, 유기물 등의 함량변화에 따라 다양하고, 경작 방법의 차이로는 작물의 종류, 부위별, 품종별, 생육시기, 경운 및 관개 등 경작방법에 따라 다양한 흡수 형태를 보인다.

Lee 등(1986b)은 토양 중 점토 함량에 대한 작물의 중금속 흡수의 차이를 보고하였는데 이는 토양 중 비소는 흡착력이 약한 사토질 토양에서는 비소의 흡수에 따른 장애가 심하게 나타난 반면 흡착력이 강한 점토질 토양에서는 비소의 장애가 약하게 나타났다. Chung과 Lee(1999)는 폐금속 광산 주변 두개의 토양통을 대상으로 중금속의 연속분획을 통하여 토양내 중금속의 잠재적인 이동성과 생물학적 흡수가능성을 검토하였다. Chung과 Noh(2005, 2006)는 사질식양토와 식질토양에서의 두 가지 이상의 중금속이 토양입자 표면에 흡착될 때 경쟁이온치환과 특정 결합기작에 따라 흡착량이 결정되고 용출과 이동성에 차이가 있음을 확인하였다.

중금속 오염지 복원 대책으로 중금속의 작물로의 흡수를 경감하기 위한 유기물인 퇴비의 효과를 언급하는데, Han 등(1997)도 유기물 처리에 의한 무의 생육과 크롭의 흡수 이행량을 조사하여 유기물 처리시 대조구에 비해 생육상태가 진전되었으며, 무로 흡수 이행되는 크롭의 양이 감소함을 보였다. 이들 유기물은 고분자의 리간드인 humic-및 fulvic-acid로서 외부에 COOH나 phenolic-OH기와 같은 양이온 흡착능이 강한 작용기를 가지고 있어 중금속과의 복합체를 형성 작물로의 흡수를 경감시킬 수 있다(Stevenson, 1982). 더불어 토양중 중금속에 대한 작물의 유효도에 영향을 미치는 요인으로 Fe/Mn oxides, CEC, 토양온도, 다른 원소의 양, 인산비료 시용 등의 연구가 보고되었다(Adriano, 1986).

일반적으로 토양pH가 떨어지면 중금속의 형태별 함량이 변화하여 작물로의 유효도가 증가한다. Nicholson 등(1997)은 토양 pH가 낮아지면 추출성 Zn, Ni, Cd 농도가 증가하고 결국 작물로의 중금속 함량이 증가함을 보고하였다. 또한 Adriano(1986)는 토양의 특성 가운데 pH와 Eh가 중금속의 유효도에 크게 영향을 미친다고 보고하였는데 원소의 종류에 따라 반응이 다를 것을 보였다. Lim 등(1991)은 토양산도를 3-11로 조절한 후 토양에서의 중금속의 흡착 및 탈착을 조사

하여 pH 6에서 최대의 흡착량을 확인하였다. 또한, 흡착량은 토양의 종류, CEC, 유기물 함량과도 관련이 있음을 보고하였다. Kim 등(2011e)은 상추 잎과 뿌리의 구리 및 아연의 흡수는 토양 중 이동태 중금속 함량과 더불어 토양pH에 강하게 영향을 받음을 보고하였다. Lee 등(2009b)은 NaOH와 주석산에 의해 화학적으로 변형된 왕겨와 톱밥 등 유기물이 중금속의 흡착능을 향상시켰는데 이는 처리에 따른 표면의 불순물이 제거되고 흡착 표면이 매끄럽고 안정화 된 것을 SEM으로 관찰되었다.

중금속 흡수에 미치는 작물내의 영향에 관한 연구가 또한 활발하다. 작물과 중금속 흡수와의 관계는 작물의 종류, 중금속의 종류, 작물의 생육기에 따라 크게 차이가 있다. Adriano (1986)는 또한 카드뮴이 무와 Swiss chard에서 비소가 상추, 보리, 목초에서 각각 다르게 흡수됨을 보였다. Fergusson (1990)은 작물의 종류에 따라 원소별로 상대적 흡수능을 조사하였다. 작물에 따라 특이한 원소를 많이 흡수함을 알 수 있고, 비교적 상추에서는 모든 원소의 흡수가 높은 반면, 쌀에서는 흡수가 낮음을 보였다. 작물의 줄기, 종실, 잎, 및 뿌리의 부위별로 또한 작물의 품종에 따라 그들의 조직 내에 중금속을 흡수하고 축적하는 능력이 원소별로 크게 차이를 보였다. Kim 등(2001)은 상추, 배추, 무 등 주요 밭작물의 카드뮴 흡수연구에서 상추의 흡수가 무, 배추의 흡수보다 많음을 확인하였다. Kim 등(2007d, 2009a)은 벼 품종간 카드뮴 및 비소의 흡수 변이를 조사하여 환경위해성과 논토양의 복원가능성을 평가하였다.

중금속의 생태계에 미치는 영향

토양오염물질이 생태계에 미치는 영향은 농경지에서의 작물 흡수를 통한 작물 생육에 미치는 영향, 수계환경에 미치는 영향 및 먹이 연쇄계를 통한 인축에 미치는 영향으로 구분될 수 있다. 카드뮴의 작물에 대한 독성 기작으로는 광합성율의 감소, 뿌리성장 저해, 작물체내 이온 상호작용의 교란, 등이 있다. Kim 등(1978b)은 벼 발아 및 묘대기 생육에 영향을 미치는 중금속 농도를 조사하였다. Lee 등(1986a, 1986b, 1987, 1988; Lee and Lim, 1987)은 토양중 비소의 행동 및 벼의 비소흡수에 의한 피해생리생태 연구를 수행하여 토양의 비소 형태와 현미중 비소함량과의 관계, 물관리가 비소 흡수에 미치는 영향, 수경시험에서의 증산과 기공저항성 등의 생리적 반응 및 벼 뿌리에 미치는 영향 등에 대하여 보고하였다. Lee 등(1990)은 중금속이 과잉 상태에서 재배된 벼의 뿌리에서 mugineic acid와 그 유사 phytosiderophore의 분비되는 특성을 조사하였다. 또한, 작물 생육에 대한 중금속의 영향을 무와 배추(Moon *et al.*, 1990), 파와 상추(Kim, 1995)를 시험 재료로 수행하였다. 또한, 아연광산 인근 중금속 오염농경지에서 옥수수(Lee *et al.*, 1994) 및 콩(Lee *et al.*, 1996a)의 생육에 미치는 영향을 조사하였다. Chung 등(2006)은 인산축적 미생물인 *Acinetobacter*종의 중금속 특히 수은에 의한 저해 효과가 가장 큰 것으로 보고하였고, Kim 등(2010g)과 Yoo 등(2011)은 인 축적 미생물의 생장에

대한 온도, pH 및 탄소원 등 환경인자와 중금속의 영향이 원소별로 민감함을 검토하여 하수의 생물학적인 제거공정에서 효율적인 운전 조건을 결정하는 자료를 제공하였다.

중금속에 의한 식물체내 생체대사의 영향으로 Kim 등 (2000b)은 시금치에서 polyamine에 의한 카드뮴의 산소방출 경감효과를 조사하여 단자엽과 쌍자엽 식물 간에 polyamine의 산소방출 과정에서 다른 효능을 보임을 확인하였다. Moon 등(2000)은 토양에 카드뮴과 비소처리에 따른 상추의 polyamine 함량변화와 유효도에 미치는 영향을 검토하였다. 타 중금속에 대한 작물 생육의 생리적 반응 영향으로 amylase 활성, 클로로필 및 단백질 함량, 유기산 및 proline의 함량 변화를 보고하였다(Han *et al.*, 1998; Kim and Lee, 1997; Kim *et al.*, 1998c).

중금속 독성의 주요 기전으로서 산화적스트레스(oxidative stress)에 기인한 영향들을 보고하였다(Shi *et al.*, 2004; Sun *et al.*, 2006). 산화적스트레스로 인해 발생하는 활성산소종의 작물 내 축적은 세포 내 구조를 손상시키고, 산화환원상태를 간섭함으로 인해 세포 기능을 억제 한다(Hatata and Abdel-Aal, 2008). Lee 등(2011f)은 고농도 비소로 오염된 백미에 대한 세포성장도, 항산화 효소활성능, 그리고 산화적스트레스와 관련된 유전자 및 단백질 수준에서의 독성영향을 평가하였다. Kim 등(2011c)은 multi-stress 저항성 유전자인 MuSI로 형질전환된 담배를 이용하여 카드뮴 오염하에서의 Catalase 및 Ascorbate peroxidase 등 항산화효소의 활성이 증가되어 산화적스트레스에 내성이 있음을 확인하였다.

중금속의 인축에 대한 영향연구는 주로 의학계에서 연구되고 있는데 Kim 등(1991b)은 식이내 카드뮴 수준차이에 따른 생쥐 체내에서의 카드뮴 축적에 관한 연구에서 흡수된 카드뮴은 주로 신장과 간에 축적되었으나 카드뮴 처리에 의한 장기의 무게는 크게 차이가 나지 않았다. Rhim(2003, 2005)은 생쥐 간세포 일차배양에서 카드뮴에 의해 유발되는 세포독성 및 지질과산화에 대한 셀레늄의 항산화 및 간보호에 미치는 효과를 보고하였다. Nam 등(2004)은 microtox 생물검정법 및 상추종자 뿌리신장법을 이용하여 하수슬러지 장기연용 토양의 독성을 평가하였다. Choi와 Kim(2007)은 토양 내 구리농도와 지렁이 체내 농축농도의 상관성으로 구리 오염지에서 지렁이의 생물지표종으로 적합성을 판단하였다. Ryu 등(2008)은 슬러지에 함유된 크롬, 아연 및 카드뮴 이온의 독성을 INT-Dehydrogenase 활성에 의해 확인하였으며 슬러지 일령(solids retention time)에 따른 활성 변화에서 독성 영향을 최소화하기 위해 일령을 길게 유지해야함을 제안하였다.

Lee 등 (2010b)은 한국, 영국 및 미국의 인체 위해성평가 모델을 이용하여 토양의 정화목표치 등을 산정하고 폐광산 인근 농경지의 용도 적합성을 정량적으로 평가하였다. 폐광산 인근 중금속으로 오염된 토양, 지하수, 및 백미섭취노출에 따른 인체위해가능성을 평가하여 위해성에 근거한 매체별 정화목표치를 산출하였다(Lee and Chon, 2005; Lee *et al.*, 2011e). 비소로 오염된 백미섭취노출로 인한 연령별 인체위해영향을 평가하였다(Paik *et al.*, 2010a, 2010b; Lee *et al.*,

2011a, 2011c). 잠재적 독성무기물질로 알려진 카드뮴, 납, 및 비소의 토양에서 백미로의 전이 및 축적과 중금속으로 흡수된 백미의 인체 노출에 따른 위해지수를 조사하였다(Park *et al.*, 2011). 중금속은 인위적인 오염원 뿐 아니라, 자연적으로 다량 존재하기 때문에, 일반 농경지 토양에서 재배되어 유통되는 농산물의 섭취에 따른 인체위해영향이 보고되었다. 유통 농산물에 대한 비소함량과 국민의 농산물 섭취량을 고려한 비소 위해성을 평가하였다(Choi *et al.*, 2010). 유통되는 곡류, 두류, 서류 (Kim *et al.*, 2000a)와 주산단지 및 폐광 인근에서 재배된 과채류 내 중금속 섭취노출에 대한 인체위해성을 평가하였다(Kim *et al.*, 2011b).

토양오염 복원기술 및 관리방안

중금속 오염토양에 대한 본격적인 복원기술개발은 1970년대 이후 미국을 주축으로 개발되었고 1980년대 이후 각종 환경규제의 강화로 경제성이 좋은 새로운 기술개발이 요구되었다. 현재 토양환경보전법(1996)에서 제시된 오염토양의 개량 방법으로 토양오염 대책기준 이상지역에서 비식용 작물재배, 경지정리 및 객토 등을 추진하고 토양오염 우려기준 이상지역에서는 객토, 석회시용, 인산시용, 유기물시용 및 물관리를 제시하고 있다. 또한, Chung(1999)과 Chung과 Yang(2006)은 오염토양의 효과적 현장조사에 대한 방법론을 제시하여 경제적인 복원방법으로 오염원, 오염정도, 주변환경, 이동경로 및 인축에 대한 피해발생 유무를 고려한 평가가 필요함을 강조하였다. 중금속 오염토양에 대한 복원과 관련하여 생물학적 유효도를 평가하는 기술 및 식물학적 복원에 대한 총설이 Kim 등(2007a, 2007b)에 의해 정리되어 있다.

최초의 중금속 오염토양의 개량연구에 관하여 앞서 언급한 Jeong과 Kim(1971)은 구리 오염 농경지에 대한 개량연구 이후, 오염토양에서도 토양개량제의 이용에 관한 연구가 꾸준히 수행되어 왔는데, Kim(1987b)은 벼의 중금속 흡수 경감을 위한 중과석, 용성인비, 소석회, 규회석 및 석고 등 몇 가지 개량제 효과에 대하여 설명하였다. Choi 등(1991)은 카드뮴 오염토양에서 여러 가지의 이화학적 처리에 따른 토양내 중금속 형태별 함량변화를 구명하여 montmorillonite 및 zeolite 등 CEC가 높은 토양 개량제의 투입을 보고하였는데, zeolite에 의한 중금속 흡착연구로는 천연zeolite에 의한 카드뮴의 흡착을 보고하였고(Kim *et al.*, 1986a; Kim *et al.*, 1991a), Jung 등(1996a, 1998a)은 퇴비, 석회, 및 규산 등의 토양개량제를 장기 연용한 토양에서 구리와 아연의 분획화를 통한 유효도 평가를 수행하여 이들 분획별 함량이 토양의 이화학적 특성과 벼 흡수와의 관계에서 연용에 따른 구리 및 아연함량의 증가를 보고하였으나 현미증의 뚜렷한 증가는 확인되지 않았다. Lee 등(2000a)은 중석광 광미매립지에서의 침출수 중금속 제거에 제올라이트를 이용하여 효과가 높음을 판단하였다. Han과 Choi(1992)는 peat에 의한 중금속의 흡착에 관한 연구도 수행되었고 Lee(2010)는 생분해되는 다양한 킬레이트제를 이용하여 납의 오염을 저감화하는 제제로 ethylenediamine(EDA)을 선별하였다. Koo와 Chung(2005)

은 biosolid 처리에 따른 유기산의 생성과 이에 따른 중금속 흡수가 증가함을 옥수수 시험에서 확인하였다. 최근, Seo 등(2008)은 다공성이며 표면적과 음이온치환용량이 큰 물질인 Mg-Al LDH(Layered Double Hydroxide)를 이용하여 수용액 중 비소와의 반응특성을 구명하고 비소제거제로서의 활용성이 매우 높은 것으로 검토하였다.

산업폐기물을 활용하여 토양중 중금속의 작물로의 유효도를 떨어뜨리는 개량제 연구가 수행되었는데 Lee 등(1998)은 폐석탄재를 알칼리액으로 가열 처리하여 제조한 인공zeolite를 이용한 폐수중 중금속 흡착으로 천연zeolite나 활성탄보다 단위 무게당 3 ~ 5배의 중금속을 흡착 제거하였다. 또한, 미역폐기물(Cho *et al.*, 2004), 굴 폐화석(Lee *et al.*, 2005), 및 해조류(Choi *et al.*, 2005) 등의 수산업 부산물의 중금속 흡탈착 특성을 검토하여 오염농경지 개량 효과를 검토하였다. Yoo 등(2005)은 부산석회를 이용한 납석광산 폐석의 중화처리에 활용 가능성을 보고하였다. Hong 등(2006)은 석탄회 사용에 따른 벼의 중금속 흡수 가능성을 검토하였다. Moon 등(2009)은 소성가공한 굴껍질을 이용하여 CCA 처리 방부목으로부터 유래한 비소오염 토양에서 토양 안정화에 효율적임이 조사되었는데 이는 석회성분에 의한 pH의 변화에 따른 용출량의 저감과 더불어 용해도가 낮은 Ca-As 침전에 따른 결과로 SEM-EDX 결과로 확인하였다. 또한 Choi 등(2011)은 폐미역을 이용한 생물흡착시스템으로 시스템별로 폐수의 중금속 제거 최적조건과 효율을 확인하였다.

또한 최근에는 중금속에 대하여 영가철의 이용 연구가 활발히 진행되고 있는데 이는 영가철의 산화환원전위 변화에 따른 유해화합물의 무독화에 초점을 두고 있다. 영가철은 6가 크롬의 환원과 비소의 불용화(Yang *et al.*, 2005, 2008; Yoo *et al.*, 2007) 등에 적용한 결과를 보고하였다. Kim 등(2010c)은 제강슬래그 등을 활용하여 토양의 pH를 증가시켜 고추 재배에서 대조구보다 유의적으로 낮은 중금속 축적 농도를 확인하였고, 유사한 연구에서 Moon 등(2010a)은 소석회 및 포틀랜드 시멘트 등을 이용하여 비소 오염토양을 안정화시키고 연속추출법에 의거하여 잔류태의 증가와 더불어 비소의 용출 농도가 저감됨을 확인하였다. 또한, Yun 등(2011)은 제강슬래그의 혼합비가 증가할수록 오염수의 중금속은 감소한 반면 비소의 함량은 증가함을 보여 이는 제강슬래그에 존재하는 인의 영향으로 판단되는 결과를 예상하였다.

Kim과 Baek(1984)은 유기물 급원으로 원예용 부엽토를 사용하여 벼의 카드뮴 흡수를 경감시키며 생육 피해를 줄일 수 있었다. 또한 Kim 등(1998b)은 중금속에 의해 오염된 상토를 이용하여 어린묘의 생육피해정도와 유기물 사용에 따른 효과를 확인하였다. Ok 등(2003)은 양친매성인 유기점토를 이용하여 유해중금속과 유기 오염물질을 동시에 제거하는 기술에 대한 최근의 연구동향 및 향후과제를 소개하였다. 최근, 유기물 급원 및 토양개량제로 활용 가능성이 있는 biochar로서 중금속 오염 개량효과를 확인하는 연구가 활발히 진행되고 있다(Lee *et al.*, 2011b).

Kim 등(1978a)은 수도품종별 중금속 흡수 억제를 위한

물관리 및 석고의 영향 연구에서 전 생육기간 담수로 인한 환원상태의 유지로 현미중의 중금속 함량을 경감시켰으며 석고 사용으로 효과를 증가시켰다. Oh(1981)는 석회물질 사용에 따른 토양내 치환성 카드뮴의 피해 경감이 pH 6.0 이상에서 수산화카드뮴으로 침전됨에 기인한다고 판단하였다. Lee 등(1984)도 석회 사용에 따른 벼의 카드뮴 흡수 경감을 보고하였고, 석회 사용에 따른 배추(Oh, 1986), 알타리무(Jung *et al.*, 2002b)의 중금속 흡수를 경감시킨 결과를 보고하였다. 벼 재배시 구리 및 카드뮴피해에 대한 토성, 물관리 및 석회물질의 효과를 구명하였다(Kim *et al.*, 1985; Jung *et al.*, 1999, 2000a, 2002b). Kim 등(2004a)은 논토양의 카드뮴 유효도와 벼의 흡수이행에 미치는 석회 및 humic acid의 사용 효과를 검토하였다. Jeong(1977)은 크롬에 의한 배추의 생육 피해 정도를 파악하고 피해대책으로 석회사용 및 석회와 퇴비의 혼용시비 효과를 구명하였다.

인산사용이 벼의 카드뮴 흡수 및 토양의 중금속 유효도가 감소함을 보고하였다(Kim, 1987a; Hong *et al.*, 2005). Kim과 Kim(1986) 및 Kim 등(1986b, 1986c, 1988)은 벼에 대한 납의 흡수 및 피해경감에 관한 연구로 사경용액 중 납 농도가 수도체 흡수 및 수량에 미치는 영향과 석회, 인산물질 사용 및 물관리로 인한 토양중 납 용출 효과를 보고하였고, 콩과 들깨 등 밭작물에 대한 석회 및 인산에 의한 작물체내의 납 함량의 감소도 검토되었다. Hong 등(2011)은 축분퇴비와 인산비료의 혼용시비가 카드뮴 오염토양에서 알타리무의 식물이용성의 감소가 인산과 카드뮴의 직접적인 침전반응에 의한 카드뮴의 부동화라기 보다는 토양 pH 및 음하전도 증가에 따른 카드뮴 흡착 증대에 기인함으로 보고하였다. 또한, Oh와 Sedberry(1974)는 벼의 비소 독성피해와 아연 처리를 통한 피해 완화를 보고하였고 Lee와 Kim(1985)은 식물체의 카드뮴 흡수가 아연 처리량의 증가에 따라 감소함을 보고하였다.

오염된 농경지 토양의 중금속 제거연구 뿐만 아니라 수용액에서의 중금속 제거하는 방법이 검토되었는데, Yang 등(1992, 1993a, 1993b)은 유기리간드-중금속 착염형성의 원리를 이용하여 부속된 퇴비로부터 추출된 부식산과 홀브산을 이용하여 복합체를 형성시키고 이를 분리하여 중금속 제거효율을 계산하였다. Lee 등(1995c)은 부식산-중금속 착화합물 형성 반응에 대한 기작 구명으로 복합체 생성에 carboxyl기만이 관여하는 것과 carboxyl기와 phenolic OH기가 동시에 관여하는 두가지 기작을 제안하였다. Lee 등(1998, 1999, 2000b)은 입상 인공zeolite를 이용한 중금속 폐수를 처리하여 중금속 제거를 통한 벼 유묘의 생육장애의 경감을 확인하였다. 수피를 이용하여 폐수중의 중금속을 흡착시켜 수질을 개선하는 연구도 수행되었다(Paik *et al.*, 1996, 1997; Park *et al.*, 2004). Lee 등(2009a)은 탄닌 성분을 함유한 밤 부산물(울피)에 의한 수용액 중의 중금속 흡착을 흡탈착 모델식 및 SEM(Scanning Electron Microscope) 분석으로 확인하였다. 또한, Kim 등(2010f)은 맥주공장 부산물인 주정오니를 활용하여 카드뮴의 흡착특성 및 효율을 평가하여 생물흡착제

로서 적용 가능성을 검토하였다. Yoo 등(2006)은 영가철을 이용하여 수용액에서의 비소 제거를, Awad 등(2010)은 나노급 영가철을 합성하였고, 이를 이용하여 수용액 상의 6가크롬을 제거하였다. 또한 이와 관련된 기사를 예측하였고, Joo 등(2011)은 버섯의 감압 동결건조한 세포를 이용하여 카드뮴과 납 이온을 수용액 상태에서 값 싼 흡착제로서 활용성을 검토하였다.

중금속 오염토양의 개량방법으로 비식용식물의 재배 이용한 식물학적 복원(phytoremediation) 연구를 활발히 수행되고 있다. Kim 등(1989b)은 마리골드가 벼의 카드뮴 흡수의 22.5배의 함량 축적능을 보였고, 흡수량으로 환산할 경우 은 수원사시나무가 벼의 35.5배를 보였다. 또한 카드뮴의 식물체 흡수량과 토양중 잔존 농도와의 유의성 있는 부의 상관을 보였다. Jung 등(1993)은 아연광산 인근지역에서 자생하는 식물종에 대한 중금속 흡착량을 조사하여 고비, 고마리, 쇠뜨기 등을 중금속 제거효과가 큰 식물종으로 구분하였다. Kang 등(1996)은 환경오염 진단 지표식물로서 잡초종을 검토하여, 카드뮴에 대한 내성을 가진 식물종을 선발하여 환경오염 모니터링에 기초자료로 활용 가능성을 확인하였고, 계속되는 연구에서 단풍잎돼지풀, 쭉, 억새, 달맞이꽃의 적용 가능성을 제시하였다(Kang *et al.*, 1998; Kim *et al.*, 1999a). 또한, Seo 등(2006)은 폐광산 주변의 목본류 식생현황을 파악하고 오염토양에 대한 목본 종자의 발아특성을 검토하였다. Jung 등(2000b, 2002a)은 카드뮴과 납 오염토양에 식물학적복원이 가능한 식물종으로 비식용작물을 대상으로 조사하여 양황철, 사철나무 등의 가능성을 제시하였다. Lee와 Kang(2001)은 아연 및 구리오염 농경지에서 식물복원종으로 담배의 이용 가능성을 검토하였다. Og 등(2003b)과 Ok 등(2004)은 중금속 오염토양의 식물정화기술과 형질전환 식물의 이용에 대한 최근의 동향을 파악하였는데 1980년대 초반의 식물정화기술은 주로 중금속 오염토양에서 서식하는 내금속식물 및 초축적식물종에 대한 연구를 수행되었고 이후 선별된 식물을 이용하여 체내 축적할 수 있는 최대 농도를 판별하고 내성 메카니즘을 추적하는 연구가 진행된다고 보고한 바 있다. Lee 등(2004)은 월동기간 카드뮴 식물복원종으로 큰이삭풀의 사용 가능성을 제안하였고, Kim 등(2008c)은 근권부로 알려진 토양과 뿌리 사이의 계면에서 일어나는 주요 기작의 이해함으로서 특정식물의 식물학적 복원 가능성을 평가하였다. Kim 등(2010b)은 식물학적 복원기술에 바이오메스 생산량 증대를 위한 biosolid를 연계하여 해바라기의 활용 가능성을 판단하였다. Lee(2010b)는 다양한 생분해성 킬레이트제를 이용하여 토양중 납의 식물학적 유효도를 증가시켜 고농도의 납 오염지에서 식물추출법에 의한 복원에 유용한 기술로 이용 가능성을 검토하였다. 또한, 농업용수의 중금속을 제거하는 식물학적 방법으로 So와 Kim(1992)은 부래옥잠, Park 등(2002)은 미나리 재배에 의한 관개수 및 중금속 오염수의 식물학적 정화방법을 제시하였다.

오염토양의 생물학적 복원에 이용되는 미생물의 연구에서 Heo 등(1992; Cho *et al.*, 1992)은 카드뮴 내성균에 의한 카

드뮴 축적기작에 대한 연구로 내성균의 세포 구성 성분별 카드뮴 축적량 및 단백질 함량변화에 대한 연구를 수행하였고, 또한 납과 구리에 대한 균체내 축적 특성에 관한 연구(Cho *et al.*, 1996, 1997a, 1997b, 1997c; 1997d, 1997e, 1998; Kim *et al.*, 2005)도 수행되었다. Kim 등(2007c)은 액체배양 상에서 *Pseudomonas stutzeri*의 납 내성에 대한 조사를 하였으며, Kim 등(2008b)은 비소 오염토양에서 Arbuscular mycorrhizae fungi를 이용하여 생장반응과 비소흡수 연구로서 이들의 복원에 이용 가능성을 검토하였다. 또한 Shagol 등(2011)은 세균의 도움을 받는 식물학적 복원의 가능성을 비소오염 토양에 적용하였다.

결론

앞으로의 농업환경 내에서의 중금속 연구 방향은 농산물 안전성과 관련하여 토양 생산력 유지와 지속성을 보장하기 위하여 농경지 중금속의 종류, 농도 및 검출 빈도조사를 통하여 농경지 중금속 오염도 현황을 파악하여 오염 농경지를 찾아내 관리하며, 주기적인 변동 조사를 통하여 오염도의 진행을 예의 주시해야 할 것이다. 또한 작물의 중금속 흡수 이행, 초축적식물 등에 의한 중금속의 흡수 및 저항성에 관한 연구가 계속되어야 할 것이다. 중금속 관련 유전자 탐색, 중금속 저항성 품종선발, 흡수 및 발현기작에 관한 연구, 중금속 오염지역의 생물학적 토양복원 및 안정성 향상 기술 개발, 토양 중금속의 형태특성, 형질전환체 개발 및 산업화와 중금속에 대한 작물별 흡수 및 축적형태와 관련된 생리생화학적 연구가 수반되어야 한다.

또한 환경오염을 경감시키는 연구가 계속되어야 할 것이다. 오염을 줄이는 신규 농업자재 즉 무카드뮴 인산비료 등의 개발이 시급하고, 휴폐광 오염원의 근본적인 대책이 취해져야 한다. 복원 대책에서 화학적 처리에 의한 중금속의 불용화, 세척 등은 근본적인 제거 방법이 될 수 없을 뿐 아니라, 불용화 화합물에 의한 2차 오염을 유발하고, 농경지 생물상의 다양성을 파괴하여 농업의 생명력을 없애는 등 부작용이 적지 않은 바 현재 활발히 진행되고 있는 중금속 오염 농경지의 근본적인 대책의 일환으로 식물학적 복원에 새롭고 많은 관심이 필요하다. 또한 방사핵종, 셀레늄, 탈리움, 극미량원소 등 새로운 중금속 오염물질에 대한 탐색 연구와 중금속의 추출 방법의 세분화를 통해, 추출 및 분석 방법을 규격화하고, 기기분석 방법을 계속 발전시켜야 할 것이다.

농산물 안전성 향상을 위한 정부의 정책 방향의 정립을 위해 관련 법률 및 제도의 개선이 필요하다. 즉, 주요오염원인 휴폐광 사후관리 및 유해폐기물의 불법농지 투기를 금지하는 법률 정비와 토양환경보전법의 보완 및 농산물 중 중금속 허용기준 설정이 또한 시급하다. 지경부, 환경부, 보건복지부, 식약청 등 관련부처간의 협조체제 구축하여 역할을 분담하고, 정보의 교환 및 자료의 공유화를 통하여 부처간 업무의 중복을 피하고, 부처 특성에 맞는 업무를 행하여야 할 것이다. 또한, 중금속 오염조사 및 방지사업을 년차별로 지속적으로 추

진하여 새로운 오염원을 찾고 또 복원하는 국가적인 사업이 계속되어야 할 것이다. 이를 위한 사업 추진 소요 예산 및 보상재원을 확보하여야 한다. 특히 지자체의 재정자립도가 낮아 오염방지사업 및 복원사업을 기피하는 현상이 많으므로 수익자 부담원칙에 의거 오염원을 유발한 사업체에 복원에 필요한 재원을 부과할 수 있는 제도적 정비도 또한 필요하다.

결론적으로 현재, 농업환경의 중금속에 대한 오염이 증가하여 소비자들의 농산물안전성에 대한 우려가 증가하고 있으며, FAO/WHO기준, EU 기준, 미 FDA 및 EPA등의 중금속 허용기준 등 세계적으로 중금속의 규제가 강화되고 있어 농산물의 안전성평가 기준 및 안전성향상 기초연구가 절실히 필요로 한다. 이러한 연구를 통하여 안전 농산물 생산을 위한 환경기준 설정의 기초 자료와 장기적으로 환경오염의 정도를 파악하고 대책수립의 자료를 제공하며 외국으로부터 수입되는 불량 농산물을 규제할 근거를 또한 제공하며 지속 가능한 농업육성 정책 수립에 많은 도움이 되리라 확신한다.

감사의 글

This study was carried out with the support of "Cooperative Research Program for Agricultural Science & Technology Development (Project No. PJ007448)", Rural Development Administration, Republic of Korea.

참고문헌

- Abdelhafez, A.A., Awad, Y.M., Kim, M.S., Ham, K.J., Lim, K.J., Joo, J.H., Yang, J.E., Ok, Y.S., 2009. Environmental monitoring of heavy metals and arsenic in soils adjacent to CCA-treated wood structures in gangwon province, South Korea, *Korean J. Environ. Agric.* 28(4), 340-346.
- Abdelhafez, A. A., Awad, Y.M., Abd El-Azeem, S.A.M., Kim, M.S., Ham, K.J., Lim, K.J., Yang, J.E., Ok, Y.S., 2010. Leaching of chromium copper and arsenic in soils and rapid identification of CCA-treated woods using modified PAN stain, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(1), 60-67.
- Adriano, D.C., 1986. *Trace elements in the terrestrial environment*. Springer. Verlag.
- Awad, Y.M., Abdelhafez, A.A., Ahmad, M., Lee, S.S., Kim, R.Y., Sung, J.K., Ok, Y.S., 2010. Synthesis of nanoscale zerovalent iron particle and its application to Cr(IV) removal from aqueous solutions, *Korean J. Environ. Agric.* 29(4), 402-407.
- Cho, J.S., Han, M.G., Heo, J.S., 1992. Isolation of cadmium-Tolerant bacteria and characterization of cadmium accumulation into the bacteria cell, *Korean J. Environ. Agric.* 11(1), 77-85.
- Cho, J.S., Lee, H.J., Heo, J.S., 1996. Characteristics of lead accumulation in lead-tolerant *Pseudomonas aeruginosa*, *Korean J. Environ. Agric.* 15(3), 306-315.
- Cho, J.S., Han, M.G., Lee, H.J., Heo, J.S., 1997a. Copper accumulation in cells of copper-tolerant bacteria, *Pseudomonas stutzeri*. *Korean J. Environ. Agric.* 16(1), 48-54.
- Cho, J.S., Lee, W.K., Choi, H.S., Heo, J.S., 1997b. Distribution of heavy metal in the cell components of heavy metal-tolerant microorganisms, *Korean J. Environ. Agric.* 16(1), 55-60.
- Cho, J.S., Lee, H.J., Lee, W.K., Heo, J.S., 1997c. Effect of external factors on heavy metal accumulation in the cell of heavy metal-tolerant microorganisms, *Korean J. Environ. Agric.* 16(2), 124-129.
- Cho, J.S., Lee, H.J., Heo, J.S., 1997d. Influence of competing ions and metabolic inhibitors on heavy metal accumulation in the cell of heavy metal-tolerant microorganisms, *Korean J. Environ. Agric.* 16(2), 142-148.
- Cho, J.S., Lee, H.J., Heo, J.S., 1997e. Heavy metal accumulation in cell of heavy metal-tolerant bacteria by some physical and chemical treatments, *Korean J. Environ. Agric.* 16(4), 311-319.
- Cho, J.S., Lee, H.J., Lee, Y.H., Sohn, B.K., Jung, Y.K., Heo, J.S., 1998. Binding site of heavy metals in the cell of heavy metal-tolerant microorganisms, *Korean J. Environ. Agric.* 17(3), 246-253.
- Cho, J.S., Park, I.N., Heo, J.S., Lee, Y.S., 2004. Biosorption and desorption of heavy metals using *undaria sp.*, *Korean J. Environ. Agric.* 23(2), 92-98.
- Choi, Y.S., Kim, K.H., 2007. Relationship between extraction methods of copper in soil and the bioaccumulated copper in earthworm, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 40(4), 298-310.
- Choi, J., Lee, J.J., Hur, N.H., 1991. Development of several methods to remove cadmium from soil contaminated with cadmium, *Korean J. Environ. Agric.* 10(2), 128-132.
- Choi, J., Chang, S.M., Lee, D.H., Choi, C.R., Park, S.D., 1998a. Effect of municipal sewage sludge application on the change of physico-chemical properties and contents of heavy metals in soils, *Korean J. Environ. Agric.* 17(2), 170-173.
- Choi, J., Chang, S.M., Lee, D.H., Choi, C.R., Park, S.D., 1998b. Effect of municipal sewage sludge application on the contents of heavy metals

- content in paeonia abliflora pall root, *Korean J. Environ. Agric.* 17(4), 287-290.
- Choi, I.W., Kim, S.U., Seo, D.C., Kang, B.H., Sohn, B.K., Rim, Y.S., Heo, J.S., Cho, J.S., 2005. Biosorption of heavy metals by biomass of seaweeds, *Laminaria species, Ecklonia stolonifera, Gelidium amansii and undaria pinnatifida*, *Korean J. Environ. Agric.* 24(4), 370-378.
- Choi, H., Park, S.K., Kim, D.S., Kim, M.H., 2010. Risk assessment of arsenic in agricultural products, *Korean J. Environ. Agric.* 29(3), 266-272.
- Choi, I.W., Seo, D.C., Kim, S.U., Kang, S.W., Lee, J.B., Lim, B.J., Kang, S.J., Jeon, W.T., Heo, J.S., Cho, J.S., 2011. Evaluation of removal efficiencies of heavy metals using brown seaweed biosorbent under different biosorption systems, *Korean J. Environ. Agric.* 30(3), 310-315.
- Chung, D.Y., 1999. Key methodologies to effective site - specific assessment in contaminated soils : a review, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 32(4), 383-397.
- Chung, J.B., Eum, J.S., 2001. Effects of organic matter and pH on chromium oxidation potential of soil, *Korean J. Environ. Agric.* 20(5), 346-351.
- Chung, D.Y., Lee, D.K., 1999. Sequential fractionation of heavy metals from mine tailings and two series of agricultural soils, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 32(4), 375-382.
- Chung, D.Y., Noh, H.H., 2005. Competitive adsorption of multi-species of heavy metals onto sandy clay loam and clay soils, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 38(5), 238-246.
- Chung, D.Y., Noh, H.H., 2006. Breakthrough curves and elution patterns of heavy metals in sandy clay loam and clay soils, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 39(1), 21-28.
- Chung, D.Y., Yang, J.E., 2006. Design scheme to develop integrated remediation technology: case study of integration of soil flushing and pneumatic fracturing for metal contaminated soil, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 39(1), 29-37.
- Chung, J.B., Cho, H.J., Jin, S.J., 2002. N/A Extractable heavy metals in phosphogypsum, *Korean J. Environ. Agric.* 21(3), 223-228.
- Chung, K.Y., Han, S.S., Kim, H.K., Choi, G.S., Kim, I.S., Lee, S.S., Woo, S.H., Lee, K.H., Kim, J.J., 2006. Inhibitory effect of the selected heavy metals on the grown of the phosphorus accumulating microorganism, *Acinetobacter sp.*, *Korean J. Environ. Agric.* 25(1), 40-46.
- Fergusson, J.E., 1990. *The heavy elements*, Chemistry, environmental impact and health effects. Pergamon Press.
- Han, K.W., Choi, H.O., 1992. Adsorption of heavy metals Cd, Cu and Zn on peat, *Korean J. Environ. Agric.* 11(3), 195-200.
- Heo, J.S., Cho, J.S., Han, M.G., 1992. Mechanism of cadmium accumulation in the cell of cadmium-Tolerant bacterium, *Pseudomonas putida*. *Korean J. Environ. Agric.* 11(1), 67-76.
- Han, K.W., Cho, J.Y., You, Y.S., 1997. Several factors on growth of radish and absorption and translocation of chromium, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 30(4), 370-376.
- Han, K.W., Cho, J.Y., Choi, J.K., 1998. Physiological responses of chromium on radish (*Raphanus Sativus L.*) and Chinese cabbages (*Brassica campestris L.*) in hydroponic culture, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 31(1), 56-60.
- Hatata, M.M., Abdel-Aal, E.A., 2008. Oxidative stress and antioxidant defense mechanisms in response to cadmium treatments, *American-Eurasian J. Agric. Environ. Sci.* 4, 655-669.
- Hong, C.O., Chung, D.Y., Ha, B.Y., Kim, P.J., 2005. Reversed effects of phosphate fertilizer on reducing phytoavailability of cadmium in mine tailing affected soil, *Korean J. Environ. Agric.* 24(3), 210-214.
- Hong, C.O., Lee, C.H., Lee, H., Lee, Y.B., Kim, P.J., 2006. Evaluating possibility of heavy metal accumulation by fly ash application in rice paddy soils, *Korean J. Environ. Agric.* 25(4), 331-338.
- Hong, C.O., Gutierrez, J., Lee, S.B., Lee, Y.B., Yu, C., Kim, P.J., 2007a. Determination of cadmium and zinc contamination source in arable soil in the vicinity of a zinc smelting factory, *Korean J. Environ. Agric.* 26(3), 204-209.
- Hong, C.O., Gutierrez, J., Oh, J.H., Lee, Y.B., Yu, C., Kim, P.J., 2007b. Cadmium and zinc uptake characteristics of corn plant in arable soil contaminated by smelting factory source, *Korean J. Environ. Agric.* 26(3), 210-216.
- Hong, C.O., Kim, S.Y., Kim, P.J., 2011. Effect of phosphate fertilizer and manure in reducing cadmium phytoavailability in radish-grown soil, *Korean J. Environ. Agric.* 30(3), 261-267.
- Hyun, H.N., Yoo, S.H., 1991. Effects of soil chemical properties on the distribution and forms of heavy metals in paddy soils near zinc mines, *Korean J.*

- Soil Sci. Fert.* 24(3), 183-191.
- Jeong, Y.H., Kim, M.K., 1971. Study on the improvement of copper polluted soil, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 4(1), 49-53.
- Jeong, Y.H., 1977. Study on the effect of heavy elements in agricultural crops and the control measures I. effect of chromium on Chinese cabbage and the control measures, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 10(4), 205-210.
- Joo, J.H., Hussein, K.A., Hassan, S.H.A., 2011. Biosorptive capacity of Cd(II) and Pb(II) by lyophilized cells of *Pleurotus eryngii*, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(4), 615-624.
- Jung, K.C., Kim, B.J., Han, S.G., 1993. Survey on heavy metals contents in native plant near old zinc - mining sites, *Korean J. Environ. Agric.* 12(2), 105-111.
- Jung, G.B., Kim, B.Y., So, K.H., Lee, J.S., Yeon, B.Y., Chung, Y.K., 1996a. Content of heavy metal in paddy soil and brown rice under long-term fertilization, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 29(2), 150-157.
- Jung, G.B., Kim, B.Y., Kim, K.S., Lee, J.S., Ryu, I.S., 1996b. Distribution of heavy metal contents in medicinal plants and soils with soil texture, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 29(2), 158-164.
- Jung, G.B., Jung, K.Y., Cho, G.H., Jung, B.G., Kim, K.S., 1997. Heavy metal contents in soils and vegetables in the plastic film house, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 30(2), 152-160.
- Jung, G.B., Lee, J.S., Kim, W.I., Yeon, B.Y., Ryu, I.S., 1998a. Fractionation and availability of Cu and Zn in paddy soils following a long - term applications of soil amendments, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 31(2), 107-113.
- Jung, G.B., Kim, H.C., Jung, K.Y., Jung, B.K., Kim, W.I., 1998b. Heavy metal contents in upland soils and crops of Korea, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 31(3), 225-232.
- Jung, G.B., Lee, J.S., Kim, W.I., Kim, B.Y., 1999. The effect of Irrigation control and the application of soil ameliorators on cadmium uptake in paddy rice. *Korean J. Environ. Agric.* 18(4), 355-360.
- Jung, G.B., Kim, K.S., Lee, J.S., Kwon, S.I., 2000a. Effects of soil texture, irrigation system, and soil ameliorators on the cadmium adsorption in soil and uptake in rice plant, *Korean J. Environ. Agric.*, 19(2), 128-133.
- Jung, G.B., Kim, W.I., Moon, K.H., 2000b. Studies on the phytoextraction of cadmium and lead contaminated soils by plants cultivation, *Korean J. Environ. Agric.*, 19(3), 213-217.
- Jung, G.B., Kim, W.I., Moon, K.H., Ryu, I.S., 2000c. Comparisons of simple extraction methods and availability for heavy metals in paddy soils, *Korean J. Environ. Agric.* 19(4), 314-318.
- Jung, G.B., Kim, W.I., Ryu, I.S., 2000d. Fractionation and availability of heavy metals in paddy soils near abandoned mining areas, *Korean J. Environ. Agric.*, 19(4), 319-323.
- Jung, G.B., Kim, W.I., Park, K.L., Yun, S.G., 2001. Vertical distribution of heavy metals in paddy soil near abandoned metal mines, *Korean J. Environ. Agric.* 20(4), 297-302.
- Jung, G.B., Kim, W.I., Lee, J.S., Kim, K.M., 2002a. Phytoremediation of soils contaminated with heavy metal by long-term cultivation, *Korean J. Environ. Agric.* 21(1), 31-37.
- Jung, G.B., Kim, W.I., Lee, J.S., Yun, S.G., 2002b. Effects of liming on uptake to crops of heavy metals in soils amended with industrial sewage sludge, *Korean J. Environ. Agric.* 21(1), 38-44.
- Jung, G.B., Kim, W.I., Lee, J.S., Shin, J.D., Kim, J.H., Yun, S.G., 2004. Assessment on the content of heavy metal in orchard soils in middle part of Korea, *Korean J. Environ. Agric.* 23(1), 15-21.
- Jung, G.B., Kim, W.I., Lee, J.S., Shin, J.D., Kim, J.H., Yun, S.G., 2005a. Availability of heavy metals in soils with different characteristics and controversial points for analytical methods of soil contamination in Korea, *Korean J. Environ. Agric.* 24(2), 106-116.
- Jung, G.B., Kim, W.I., Lee, J.S., Lee, J.S., Park, C.W., Koh, M.H., 2005b. Characteristics of heavy metal contamination in residual mine tailings near abandoned metalliferous mines in Korea, *Korean J. Environ. Agric.* 24(3), 222-231.
- Jung, G.B., Lee, J.S., Kim, W.I., Kim, J.H., Shin, J.D., Yun, S.G., 2005c. Fractionation and potential mobility of heavy metals in tailings and paddy soils near abandoned metalliferous mines, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 38(5), 259-268.
- Jung, G.B., Kim, W.I., Lee, J.S., Shin, J.D., Kim, J.H., Lee, J.T., 2006. Availability of heavy metals in soil and their translocation to water dropwort (*Oenanthe javanica DC.*) cultivated near industrial complex, *Korean J. Environ. Agric.* 25(4), 323-330.
- Jung, G.B., Lee, J.S., Kim, W.I., Kim, J.H., Yun, S.G., 2007a. Wet deposition of heavy metals in Suwon area, *Korean J. Environ. Agric.* 26(2), 116-123.

- Jung, G.B., Kim, W.I., Lee, J.S., Kim, J.H., Lee, J.T., 2007b. Relationships between speciation of heavy metals in soil and water dropwort (*Oenanthe javanica* DC.) cultivated near industrial complex, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 40(2), 164-171.
- Jung, G.B., Lee, J.S., Kim, W.I., Ryu, J.S., Yun, S.G., 2008. Monitoring of seasonal water quality variations and environmental contamination in the sambo mine creek, Korea. *Korean J. Environ. Agric.* 27(4), 328-336.
- Jung, G.B., Kim, M.K., Lee, J.S., Kim, W.I., Kim, G.Y., Ko, B.G., Kang, K.K., Kwon, S.I., 2011. Wet deposition of heavy metals during farming season in taean, Korea, *Korean J. Environ. Agric.* 30(2), 153-159.
- Kabata-Pendias, A., Pendias, H. 1984. Trace elements in soils and plants, CRC Press, Inc.
- Kang, B.H., Shim, S.I., Lee, S.G., 1996. Application of weed species as the diagnostic indicator plants of environmental pollution, *Korean J. Environ. Agric.* 15(1), 46-69.
- Kang, B.H., Shim, S.I., Lee, S.G., Kim, K.H., Chung, I.M., 1998. Study on the potential of phytoremediation using wild plants for heavy metal pollution, *Korean J. Environ. Agric.* 17(4), 312-318.
- Kang J.M. 2007. Heavy metal contents in commercial feed and pig manure in Korea. Korean Agricultural Products Quality Management Service Annual Research Report.
- Kim, B.J. 1987a. Studies on the effects of phosphorous on cadmium uptake by rice plant, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 20(1), 11-16.
- Kim, B.J., 1987b. Studies on the effects of several amendments on the uptake of Cd, Cu and Zn by rice plant, *Korean J. Environ. Agric.* 6(1), 25-30.
- Kim, B.Y., 1995. Effect of heavy metal contents in upland soil on the uptake by green onion and lettuce and their growth, *Korean J. Environ. Agric.* 14(3), 253-262.
- Kim, M.K., Lee, K.S., 1983. Heavy metal contents of the drainage- basin soil in Daejon area, *Korean J. Environ. Agric.* 2(2), 78-82.
- Kim, S.J., Baek, S.H., 1984. Effect of leaf mold on Cd uptake in paddy soil by rice plant, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 18(1), 99-104.
- Kim, S.J., Ryang, H.S., 1985. Studies on the heavy metals in paddy rice and soils in Jang-hang smelter, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 18(4), 336-347.
- Kim, S.J., Ryang, H.S., 1986. Heavy metals in paddy rice and soils in Mangyeong river area, *Korean J. Environ. Agric.* 5(1), 11-23.
- Kim, K.J., Paik, K.H., 1986. The effects of bark on heavy metal adsorption. I. The effects of pine and oak barks adsorption of Fe⁺⁺ and Ni⁺⁺ in wastewater. *Korean J. Environ. Agric.* 5(1), 55-60.
- Kim, B.Y., Kim, K.S., 1986. Studies on uptake by crops of lead and reduction of it's damage. I. effects of the lead uptake and yield of the rice plant related to concentration of lead in sandy liquid culture, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 19(2), 147-151.
- Kim, S.J., Baek, S.H., 1994. Variation of cadmium and zinc content in paddy soil and rice from the Janhang smelter area, *Korean J. Environ. Agric.* 13(2), 131-141.
- Kim, B.Y., Lee, M.H., 1995. Comparison of the analytical methods for Cd in brown rice, *Korean J. Environ. Agric.*, 14(3), 338-344.
- Kim, S.K., Lee, S.C., 1997. Effects of seed soaking of kinetin with zinc treatment on a-amylase activity and free proline content during germination of rice (*Oryza sativa* L.), *Korean J. Environ. Agr.* 16(3), 245-248.
- Kim, J.O., Ha, Y.L., Kim, B.J., 1978a. Studies on the effects of irrigation control and gypsum on the Cd uptake by different species of rice plant, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 11(2), 113-118.
- Kim, B.J., Ha, Y.L., Kim, J.O., Han, K.H., 1978b. Influence of toxic heavy metals on germination of rice seeds and growth of rice seedling, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 11(2), 119-126.
- Kim, B.Y., Kim, K.S., Cho, J.K., 1982. Survey on heavy metals in paddy soil and brown rice in Korea, *Ann. Report of Agr. Exp. Research* 24, 51-57.
- Kim, K.S., Kim, B.Y., Park, Y.S., 1983. Effect of various cadmium compounds on the growth and cadmium uptake of paddy rice, *Korean J. Environ. Agric.* 2(1), 6-12.
- Kim, K.S., Kim, B.Y., Lee, M.H., Han, K.H., Kim, M.S., 1985. Effect of water management and lime application on the growth and copper uptake of paddy rice, *Korean J. Environ. Agric.* 4(2), 102-107.
- Kim, Y.K., Lee, J.J., Choi, J., 1986a. Cadmium adsorption by natural zeolite. *Korean J. Environ. Agric.* 5(2), 101-105.
- Kim, K.S., Kim, B.Y., Han, K.H., 1986b. Studies on uptake by crops of lead and reduction of it's damage. II. Effect of application of calcium and

- phosphate materials on Pb solubility in soil, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 19(3), 217-221.
- Kim, B.Y., Kim, K.S., Han, K.H., 1986c. Studies on uptake of lead by crops and reduction of its damage. III. Effect of water management and lime application on Pb uptake in paddy rice, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 19(4), 291-296.
- Kim, B.Y., Kim, K.S., Han, K.H., 1988. Studies on lead uptake by crops and reduction of its damage. IV. Effects of application of calcium and phosphate materials on lead uptake by upland crops, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 21(4), 426-433.
- Kim, D.H., Kim, S.K., Kwon, O.K., 1989a. Studies on the correlation between heavy metal contents of apple orchard lands and its' leaves, *Korean J. Environ. Agric.* 8(1), 1-6.
- Kim, B.Y., Kim, K.S., Cho, J.K., 1989b. Studies on the cadmium removal from soil through crops cultivation, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 22(2), 111-115.
- Kim, S.J., Baek, S.H., Han, G.L., 1989c. Long-term sludge application on extractable contents of copper in soils, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 22(2), 116-121.
- Kim, S.J., Baek, S.H., Kim, J.Y., Yoo, H.C., 1990. Effect of municipal sludge on contents of cadmium and zinc in crop plants. *Korean J. Environ. Agric.* 9(2), 121-131.
- Kim, S.S., Park, M., Hur, N.H., Choi, J., 1991a. Development of heavy metal adsorbent utilizing natural zeolite. *Korean J. Environ. Agric.* 10(1), 11-19.
- Kim, S.J., Baek, S.H., Kook, J.H., 1991b. Effect of dietary cadmium levels on cadmium accumulation in feeding mice, *Korean J. Environ. Agric.* 10(1), 77-83.
- Kim, S.J., Baek, S.H., Chung, D.J., 1992a. Effects of municipal sewage sludge on contents of lead and copper in crop plants, *Korean J. Environ. Agric.* 11(1), 9-19.
- Kim, S.J., Ryu, T.K., Lee, M.S., Yang, C.H., Jeon, K.S., Baek, S.H., 1992b. Variation of lead content in paddy rice and soil of Mangyeong river area, *Korean J. Environ. Agric.* 11(3), 177-184.
- Kim, S.J., Ryu, T.K., Lee, M.S., Yang, C.H., Jeon, K.S., Baek, S.H., 1992c. Variation of lead content in paddy rice and soil of janghang smelter area, *Korean J. Environ. Agric.* 11(3), 185-193.
- Kim, B.Y., Kim, K.S., Lee, J.S., Yoo, S.H., 1993. Survey on the natural heavy metal contents in fruits and orchard soils in Korea, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 35(2), 280-290.
- Kim, S.J., Lee, M.S., Ryu, T.K., Yang, C.H., Moon, K.H., Baek, S.H., 1994a. Variation of copper content in paddy soil and rice from Janghang smelter area, *Korean J. Environ. Agric.* 13(1), 1-9.
- Kim, S.J., Lee, M.S., Ryu, T.K., Kim, U.S., Yoon, K.W., Baek, S.H., 1994b. Variation of copper content in paddy soil and rice from Mangyeong river area, *Korean J. Environ. Agric.* 13(1), 10-18.
- Kim, S.J., Baek, S.H., Kim, U.S., Moon, K.H., Kang, G.W., 1994c. Variation of cadmium and zinc content in rice and soil of the Mangyeong river area, *Korean J. Environ. Agric.* 13(2), 142-150.
- Kim, B.Y., Lim, S.U., Park, J.H., 1994d. Influence of fly ash application on content of heavy metal in the soil I. content change by the application rate, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 27(2), 65-71.
- Kim, B.Y., Lim, S.U., Park, J.H., 1994e. Influence of fly ash application on content of heavy metal in the soil II. content change by the successive application, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 27(2), 72-77.
- Kim, B.Y., Jung, G.B., Lim, S.U., Park, J.H., 1994f. Influence of fly ash application on content of heavy metals in the soil III. content change in the rice and soybean by the application rate, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 27(3), 220-225.
- Kim, B.Y., Lee, J.S., So, K.H., Cho, J.K., Park, J.H., 1995a. Influence of fly ash application on content of heavy metal in the soil IV. changes of the heavy metal content of the infiltration water at paddy field, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 28(2), 130-134.
- Kim, B.Y., Jung, B.K., Choi, J.W., Yun, E.S., Choi, S., 1995b. Heavy Metals in Paddy Soil of Korea, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 28(4), 295-300.
- Kim, S.J., Baek, S.H., Moon, K.H., 1996a. Fractionation of heavy metals and correlation with their contents in rice plant grown in paddy near smelter area. *Korean J. Environ. Agric.* 15(1), 1-10.
- Kim, Y.W., Yoon, C.H., Shin, B.S., Kim, K.S., 1996b. Effects of fly ash on heavy metal contents in percolated water of paddy soil, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 29(3), 236-242.
- Kim, S.J., Baek, S.H., Moon, K.H., 1996c. A correlation between the fractionation of heavy metals in the paddy soil of the Mangyeong river basin and their uptake by rice plants grown on it, *Korean J. Environ. Agric.* 15(3), 372-382.
- Kim, S.J., Baek, S.H., Moon, K.H., Jang, K.H., Kim,

- S.J., 1998a. Distribution of heavy metals in soil at Iksan 1st industrial complex area, *Korean J. Environ. Agric.* 17(1), 48-53.
- Kim, J.G., Lee, C.H., Lee, W.S., Lim, S.K., 1998b. Effect of organic matter application on heavy metal uptake of infant rice seedling, *Korean J. Environ. Agric.* 17(2), 150-155.
- Kim, S.K., Lee, S.C., Min, G.G., Lee, S.P., Choi, B.S., Yeo, S.K., 1998c. Effects of copper and zinc on germination, chlorophyll and organic compounds in seedling of rice (*Oryza sativa L.*), *Korean J. Soil Sci. Fert.* 31(1), 51-55.
- Kim, J.G., Lim, S.K., Lee, S.H., Yoon, Y.M., Lee, C.H., Jeong, C.Y., 1999a. Evaluation of heavy metal pollution and plant survey around inactive and abandoned mining areas for phytoremediation of heavy metal contaminated soils. *Korean J. Environ. Agric.*, 18(1), 28-34.
- Kim, S.J., Baek, S.H., Moon, K.H., Jang, K.H., Kim, S.J., 1999b. Distribution of heavy metals in soil at Iksan 2nd industrial complex area, *Korean J. Environ. Agric.*, 18(3), 250-258.
- Kim, M.H., Chang, M.I., Chung, S.Y., Sho, Y.S., Hong, M.K., 2000a. Trace metal contents in cereals, pulses, potatoes and their safety evaluation, *J. Korean Soc. food Sci, nutr.* 29 (3), 364-368.
- Kim, T.W., Lee, J.Y., Lee, Y.S., Hwang, S.W., Yoon, Y.S., 2000b. Polymine alleviates inhibition of O₂ evolution by Cd for spinach, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 33(4), 247-252.
- Kim, W.I., Jung, G.B., Kim, M.K., Park, K.L., Yun, S.G., 2001. Effects of cadmium concentration in soils on growth and cadmium uptake of vegetable, *Korean J. Environ. Agric.* 20(3), 175-179.
- Kim, W.I., Jung, G.B., Lee, J.S., Kim, J.H., Shin, J.D., Yun, S.G., 2003. Heavy metal contents in commercial horticultural growing media, *Korean J. Environ. Agric.* 22(3), 233-235.
- Kim, M.K., Kim, W.I., Jeong, G.B., Park, G.L., Yun, S.G., Eom, G.C., 2004a. Effects of lime and humic acid on the cadmium availability and its uptake by rice in paddy soils, *Korean J. Environ. Agric.* 23(1), 28-33.
- Kim, M.C., S.T. Song, and K.J. Hwang. 2004b. Evaluation of slurry, urine and fermented liquid manure at pig farms in Jeju area regarding chemical composition and pollution level, *J. Anim. Sci. & Technol.* 46(3):469-478.
- Kim, S.U., Choi, I.W., Seo, D.C., Han, M.H., Kang, B.H., Heo, J.S., Shon, B.K., Cho, J.S., 2005. Biosorption of heavy metal in aqueous solution by heavy metal tolerant microorganism isolated from heavy metal contaminated soil, *Korean J. Environ. Agric.* 24(4), 379-385.
- Kim, K.R., Kim, K.H., Owens, G., Naidu, R., 2007a. Hyperaccumulation mechanism in plants and the effects of roots on rhizosphere soil chemistry-a critical review, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 40(4), 280-291.
- Kim, K.R., Kim, K.H., Owens, G., Naidu, R., 2007b. Assessment techniques of heavy metal bioavailability in soil-a critical review, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 40(4), 311-325.
- Kim, S.J., Jung, A.Y., Joo, J.H., 2007c. Lead tolerance profile of *Pseudomonas stutzeri* in liquid culture, *Korean J. Environ. Agric.* 26(4), 332-336.
- Kim, W.I., Yang, J.E., Jung, G.B., Park, B.J., Park, S.W., Kim, J.K., Kwon, O.K., Ryu, G.H., 2007d. Bioavailability and safety issues of heavy metals in paddy soil-rice continuum in Korea, *Food & Fertilizer Technology Bulletin* 597.
- Kim, J.H., Han, K.H., Lee, J.S., 2008a. Unit loadings of heavy metals by non-point sources-case study in a valley watershed, *Korean J. Environ. Agric.* 27(1), 35-43.
- Kim, D.Y., Lee, Y.J., Lee, J.K., Koo, N., Kim, J.G., 2008b. Growth response and arsenic uptake of white clover (*Trifolium repens*) and evening primrose (*Oenothera odorata*) colonized with arbuscular mycorrhizal fungi in arsenic-contaminated soil, *Korean J. Environ. Agric.* 27(1), 50-59.
- Kim, K.R., Owens, G., Naidu, R., Kim, K.H., 2008c. Influence of vetiver grass (*Vetiveria zizanioides*) on rhizosphere chemistry in long-term contaminated soils, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 41(1), 55-64.
- Kim, W.I., Kim, M.S., Roh, K.A., Yun, S.G., Park, B.J., Jung, G.B., Kang, C.S., Cho, K.R., Ahn, M.S., Choi, S.C., Kim, H.J., Kim, Y.S., Nam, Y.K., Choi, M.T., Moon, Y.H., Uhm, M.J., Kim, H.K., Kim, H.W., Seo, Y.J., Kim, J.S., Choi, Y.J., Lee, Y.H., Lee, S.C., and Hwang, J.J., 2008d. Long-term monitoring study of heavy metal contents in paddy soils, *Korean J. Soil Sci. Fert.*, 41(3):190-198.
- Kim, W.I., Park, B.J., Park, S.W., Kim, J.K., Kwon, O.K., Jung, G.B., Lee, J.K., Kim, J.G., 2008e. Relationship between fraction of Cd in paddy soils near closed mine and Cd in polished rice cultivated on the same fields, *Korean J. Soil Sci.*

- Fert.* 41(3), 184-189.
- Kim, W.I., Kim, J.K., Yoo, J.H., Paik, M.K., Park, S.W., Kwon, O.K., Hong, M.K., Yang, J.E., Kim, J.G., 2009a. Risk assessment of As, Cd, Cu and Pb in different rice varieties grown on the contaminated paddy soil, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 42(1), 53-57.
- Kim, K.R., Owens, G., Naidu, R., Kwon, S.I., Kim, K.H., 2009b. Lead induced organic acid exudation and citrate enhanced Pb uptake in hydroponic system, *Korean J. Environ. Agric.* 28(2), 146-157.
- Kim, R.Y., Sung, J.K., Lee, J.Y., Kim, S.C., Jang, B.C., Kim, W.I., Ok, Y.S., 2010a. Chromium distribution in Korean soils: a review, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(3), 296-303.
- Kim, K.R., Naidu, R., Kim, J.G., 2010b. Utilization of biosolid for enhanced heavy metal removal and biomass production in contaminated soils, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(5), 558-564.
- Kim, K.R., Park, J.S., Kim, M.S., Koo, N.I., Lee, S.H., Lee, J.S., Kim, S.C., Yang, J.E., Kim, J.G., 2010c. Changes in heavy metal phytoavailability by application of immobilizing agents and soil cover in the upland soil nearby abandoned mining area and subsequent metal uptake by red pepper, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(6), 864-871.
- Kim, W.I., Kim, J.J., Yoo, J.H., Kim, J.Y., Lee, J.H., Paik, M.K., Kim, R.Y., Im, G.J., 2010d. Arsenic fractionation and bioavailability in paddy soils near closed mines in Korea, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(6), 917-922.
- Kim, R.Y., Sung, J.K., Lee, J.Y., Lee, Y.J., Jung, S.J., Lee, J.S., Jang, B.C., 2010e. Accumulation, mobility, and availability of copper and zinc in plastic film house soils using speciation analysis, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(6), 973-944.
- Kim, M.S., Ham, K.J., Ok, Y.S., Gang, S.H., 2010f. Adsorption characteristics of cadmium ions from aqueous solution using by-product of brewing, *Korean J. Environ. Agric.* 29(2), 152-158.
- Kim, H.J., You, R.B., Han, S.S., Woo, S.H., Lee, M.S., Baek, K.T., Chung, K.Y., 2010g. Effect of the various heavy metals on the growth and phosphorus (P) Removal capacity of the phosphorus accumulating microorganism (*Pseudomonas sp.*), *Korean J. Environ. Agric.* 29(2), 189-196.
- Kim, J.Y., Kim, Y.J., Yoo, J.H., Lee, J.H., Kim, M.J., Kang, D.W., Im, G.J., Hong, M.K., Shin, Y.J., kim, W.I., 2011a. A study on the factors causing analytical errors through the estimation of uncertainty for cadmium and lead analysis in tomato paste, *Korean J. Environ. Agric.* 30(2), 179-188.
- Kim, J.Y., Choi, N.G., Yoo, J.H., Lee, J.H., Lee, Y.G., Jo, K.K., Lee, C.H., Hong, S.M., Im, G.J., Hong, M.K., Kim, W.I., 2011b. Monitoring and risk assessment of cadmium and lead in agricultural products, *Korean J. Environ. Agric.* 30(3), 330-338.
- Kim, K.H., Kim, Y.N., Lim, G.H., Lee, M.N., Jung, Y.H., 2011c. Expression of catalase (CAT) and ascorbate peroxidase (APX) in *MuSI* transgenic tobacco under cadmium stress, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(1), 38-47.
- Kim, R.Y., Jung, G.B., Sung, J.K., Lee, J.Y., Jang, B.C., Yun, H.B., Lee, Y.J., Song, Y.S., Kim, W.I., Lee, J.S., Ha, S.K., 2011d. Understanding of a Korean standard for the analysis of hexavalent chromium in soils and interpretation of their results, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(5), 727-733.
- Kim, R.Y., Sung, J.K., Lee, J.Y., Jang, B.C., Ha, S.K., Lee, J.S., 2011e. Influence of soil pH, total and mobile contents on copper and zinc uptake by lettuce grown in plastic film houses, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(6), 1042-1047.
- Koo, B.J., Chung, D.Y., 2005. Effects 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.
- Kwon, S.I., Jung, K.Y., Jung, G.B., Park, B.G., 2000. Distribution of chromium in radish and soil by successive leather processing sludge treatment, *Korean J. Environ. Agric.* 19(1), 20-25.
- Lee, J.H., 2001. Influences of sulfate and nitrate application on cadmium sorption in soils, *Korean J. Environ. Agric.* 20(5), 352-357.
- Lee, S.M., 2010. Effect of various biodegradable chelating agents on growth of plants under lead stress, *Korean J. Environ. Agric.* 28(4), 61-65.
- Lee, M.H., Kim, B.Y., 1985. The effect of Cd and Zn elements applied to soil on the growth and their uptake of corn plant, *Korean J. Environ. Agric.* 4(1), 11-17.
- Lee, S.R., Song, K.J., 1985. A survey on the heavy metal concentration of soil samples around Onsan industrial complex, *Korean J. Environ. Agric.* 4(2), 88-94.
- Lee, J.J., Choi, J., 1986a. Investigation of heavy metal (Zn, Cu, Cd, Pb) contents in the effluents, soils and plants at Keumho riverside, *Korean J.*

- Environ. Agric.* 5(1), 24-29.
- Lee, J.J., Choi, J., 1986b. Heavy metal (Zn, Cu, Cd, Pb) distribution and its form of the sludges on Keumho river and her branches, *Korean J. Environ. Agric.* 5(1), 30-34.
- Lee, S.R., Song, K.J., 1986. A survey on the heavy metal concentrations of crop materials grown near Onsan industrial complex, *Korean J. Environ. Agric.* 5(1), 43-47.
- Lee, M.H., Lim, S.K., 1987. Behaviors of arsenic in paddy soils and effects of absorbed arsenic on physiological and ecological characteristic of rice plant. III Effect of water management on As uptake and the growth of rice plant at As added soil, *Korean J. Environ. Agric.* 6(1), 1-6.
- Lee, S.J., Kim, J.E., 1991a. Pollution of Pb in paddy field soil and plants at roadside areas - I. Pollution of Pb in paddy field soil and its chemical forms, *Korean J. Environ. Agric.* 10(1), 1-10.
- Lee, S.J., Kim, J.E., 1991b. Pollution of Pb in paddy field soil and rice plant at roadside areas - II. A study of the relationship between the content of Pb in paddy field soil and rice plant, *Korean J. Environ. Agric.* 10(2), 138-148.
- Lee, S.M., Cho, C.M., 1999. Transport characteristics of Cd, Cu and Zn in a sewage sludge - treated calcareous soil, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 32(4), 412-420.
- Lee, S.M., Goh, T.B., 2000. Kinetic study of cadmium adsorption by sewage sludge, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 33(1), 32-39.
- Lee, S.G., Kang, B.H., 2001. Feasibility of tobacco (*nicotiana tabacum L.*) for phytoremediation of soil contaminated with Zn and Cu, *Korean J. Environ. Agric.* 20(4), 211-217.
- Lee, J.S., Chon, H.T., 2005. Risk assessment of arsenic by human exposure of contaminated soil, ground water, and rice grain, *Econ. Environ. Geol.* 38(5), 535-545.
- Lee, J.H., Doolittle, J.J., 2006. Investigation of cadmium and zinc interactions in soils using desorption isotherms, *Korean J. Environ. Agric.* 25(2), 157-163.
- Lee, M.H., Kim, B.J., Park, Y.S., Bin, Y.H., 1981. Studies on the method of cadmium analysis in paddy soils, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 14(4), 230-235.
- Lee, M.H., Kim, K.S., Kim, B.Y., Han, K.H., 1984. Effect of lime application on growth and Cd uptake of paddy rice, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 17(3), 258-264.
- Lee, M.H., Lim, S.K., Kim, B.Y., 1986a. Behaviors of arsenic in paddy soils and effects of absorbed arsenic on physiological and ecological characteristic of rice plant. I Distribution of arsenic fractions in paddy soils and their relations to arsenic content in brown rice, *Korean J. Environ. Agric.* 5(1), 35-42.
- Lee, M.H., Lim, S.K., Kim, B.Y., 1986b. Behaviors of arsenic in paddy soils and effects of absorbed arsenic on physiological and ecological characteristic of rice plant. II Effect of As treatment on the growth and As uptake of rice plant, *Korean J. Environ. Agric.* 5(2), 95-100.
- Lee, M.H., Lim, S.K., Kim, B.Y., 1987. Behaviors of arsenic in paddy soils and effects of absorbed arsenic on physiological and ecological characteristic of rice plant. IV Effect of As content in water culture on transpiration, stomatal resistance, temperature and humidity in the leaves of rice plant, *Korean J. Environ. Agric.* 6(2), 39-45.
- Lee, M.H., Lim, S.K., Park, Y.D., Lee, S.H., 1988. Behaviors of arsenic in paddy soils and effects of absorbed arsenic on physiological and ecological characteristics of the rice plant. V Effect of arsenic added to soil on ecological characteristics of the rice plant, *Korean J. Environ. Agric.* 7(1), 21-25.
- Lee, J.J., Wada, H., Choi, J., 1990. Secretion characteristics of mugineic acid and its analogous phytosiderophore from high heavy metal - induced rice roots. *Korean J. Environ. Agric.* 9(1), 39-45.
- Lee, J.P., Park, N.K., Kim, B.J., 1994. Influence of heavy metal contents in soils near old zinc - mining sites on the growth of corn, *Korean J. Environ. Agric.* 13(3), 241-250.
- Lee, J.J., Choi, J., Chang, S.M., 1995a. Heavy metal adsorption on the natural zeolite saturated with cation, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 28(1), 28-32.
- Lee, J.J., Chang, S.M., Choi, J., 1995b. Adsorption of heavy metal cations by Fe and Al hydroxides, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 28(2), 105-113.
- Lee, J.J., Chang, S.M., Choi, J., 1995c. Mechanisms of humic acid-heavy metal complexation, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 28(2), 114-122.
- Lee, J.P., Park, N.K., Park, S.D., Choi, B.S., Kim, B.J., 1996a. Effect of heavy metal contents in soils near old zinc - mining sites on the growth of and their

- uptake by soybean, *Korean J. Environ. Agric.* 15(3), 275-281.
- Lee, H.J., Jeong, I.H., Cho, J.S., Heo, J.S., 1996b. Degradation characteristics of paper sludge and changes of heavy metals in soil, *Korean J. Environ. Agric.* 15(3), 296-305.
- Lee, H.J., Cho, J.S., Lee, W.K., Heo, J.S., 1997. Effects of municipal sewage and industrial wastewater sludge composts on chemical properties of soil and growth of corn plant, *Korean J. Environ. Agric.* 16(3), 220-226.
- Lee, D.B., Lee, K.B., Lee, S.B., Han, S.S., Henmi, T., 1998. Sorption of heavy metals from the wastewater by the artificial zeolite, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 31(1), 61-66.
- Lee, D.B., Lee, K.B., Lee, S.B., Kim, J.D., Henmi, T., 1999. Effect of artificial granular zeolite (AGZ) on purification of heavy metals in wastewater and alleviation of rice seedling growth damage, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 32(4), 446-451.
- Lee, D.H., Oh, S.G., Choi, C.L., Park, M., Choi, J., 2000a. Heavy metal removal in leaching water from the region buried tungsten tailing, *Korean J. Environ. Agric.*, 19(3), 218-222.
- Lee, D.B., Henmi, T., Lee, K.B., Kim, J.D., 2000b. Studies on the production of artificial zeolite from coal fly ash and its utilization in agro-environment, *Korean J. Environ. Agric.* 19(5), 401-418.
- Lee, O.M., Jeong, J.H., Im, S.G., Kim, J.G., Og, Y.S., 2003. Soil-water partition coefficients for cadmium in some Korean soils, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 36(4), 200-209.
- Lee, H.N., Og, Y.S., Kim, J.G., 2004. Screening of wintering Cd hyperaccumulators, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 37(1), 14-18.
- Lee, J.Y., Hong, C.O., Lee, C.H., Lee, D.K., Kim, P.J., 2005. Dynamics of heavy metals in soil amended with oyster shell meal, *Korean J. Environ. Agric.* 24(4), 358-363.
- Lee, J.H., Doolittle, J.J., Oh, B.T., 2006. Evaluation of sequential extraction techniques for selected heavy metal speciation in contaminated soils, *Korean J. Environ. Agric.* 25(3), 236-246.
- Lee, H.Y., Hong, K.C., Lim, J.E., Joo, J.H., Yang, J.E., Ok, Y.S., 2009a. Adsorption of heavy metal ions from aqueous solution by chestnut shell, *Korean J. Environ. Agric.* 28(1), 69-74.
- Lee, H.Y., Jeon, C., Lim, K.J., Hong, K.C., Lim, J.E., Choi, B.S., Kim, N.W., Yang, J.E., Ok, Y.S., 2009b. Adsorption characteristics of heavy metals ions onto chemically modified rice husk and sawdust from aqueous solutions, *Korean J. Environ. Agric.* 28(2), 158-164.
- Lee, Y.H., Lee, S.T., Heo, J.Y., Kim, M.G., Hong, K.P., Kim, E.S., Song, W.D., Rho, C.W., Lee, J.H., Jeon, W.T., Ko, B.G., Rho, K.A., Ha, S.K., 2010a. Monitoring of heavy metal contents from paddy soil in Gyeongnam Province, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(3), 289-295.
- Lee, J.S., Kim, Y.N., Kim, K.H., 2010b. Suitability assessment for agriculture of soils adjacent to abandoned mining areas using different human risk assessment models, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(5), 674-683.
- Lee, J.H., Kim, W.I., Jeong, E.J., Yoo, J.H., Kim, J.Y., Lee, J.B., Im, G.J., Hong, M.K., 2011a. Assessment of health risk associated with arsenic exposure from soil, groundwater, polished rice for setting target cleanup level nearby abandoned mines, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(1), 38-47.
- Lee, S.E., Ahmad, M., Usman, A.A.R.A., Awad, Y.M., Min, S.H., Yang, J.E., Lee, S.S., Ok, Y.S., 2011b. Effects of biochar on soil quality and heavy metal availability in a military shooting range soil in Korea, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(1), 67-77.
- Lee, J.H., Kim, W.I., Jung, E.J., Yoo, J.H., Kim, J.Y., Paik, M.K., Park, B.J., Im, G.J., Hong, M.K., 2011c. Arsenic contamination of polished rice produced in abandoned mine areas and its potential human risk assessment using probabilistic techniques, *Korean J. Environ. Agric.* 30(1), 43-51.
- Lee, J.H., Go, W.R., Kunhikrishnan, A., Yoo, J.H., Kim, J.Y., Kim, W.I., 2011d. Chemical composition and heavy metal contents in commercial liquid pig manures, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(6), 1085-1088.
- Lee, J.H., Kim, W.I., Jeong, E.J., Yoo, J.H., Kim, J.Y., Lee, J.B., Im, G.J., Hong, M.K., 2011e. Assessment of health risk associated with arsenic exposure from soil, groundwater, polished rice for setting target cleanup level nearby abandoned mines, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(1), 38-47.
- Lee, J.H., Jeong, E.J., Im, G.J., Hong, M.K., Kim, W.I., 2011f. Human HaCaT cell toxicity associated with oxidative stress on the polished rice grown adjacent to abandoned mines and potential health risk through rice intake, *J. Korean Soc. Appl. Biol. Chem.* 54(6), 978-985.

- Lim, S.U., Kim, S.K., 1983. Distribution of cadmium fractions in paddy soils and their relation to cadmium content in brown rice, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 16(1), 28-35.
- Lim, S.K., Lee, Y.J., Choi, H.J., 1991. Effects of soil solution pH on adsorption and desorption of Cd, Cu and Zn by soils, *Korean J. Environ. Agric.* 10(2), 119-127.
- Lim, D.K., Lee, S.H., Kwon, S.I., Seong, K. S., Lee, J.T., Song, B.H., 2006. Study of trace element and PAHs distribution for extensive regulation establishment in raw material of compost on organic resource, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 39(6), 339-344.
- Lim, H.C., Moon, K.H., Jeon, S.J., Chang, K.M., Hyun, H.N., 2008. Characteristics of natural pedo-geochemical background for Ni, Cu and Zn in volcanic soils of of jeju, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 41(3), 199-205.
- Lim, H.C., Moon, K.H., Jeon, S.J., Park, W.P., Hyun, H.N., 2009. Sequential extraction of trace elements and uptake by pakchoi from volcanic soils in jeju island, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 42(2), 65-69.
- Moon, Y.H., Kim, Y.H., Ryang, H.S., 1990. Effects of heavy metals Cr, Ni, Cu, Zn on growth of radish and Chinese cabbage in soils, *Korean J. Environ. Agric.* 9(2), 113-119.
- Moon, K.H., Koh, M.H., Kim, W.I., Jung, G.B., Kim, K.M., 2000. Changes of polyamine content and phytoavailability in *Lactuca sativa* cultivated in cadmium and arsenic treated soil, *Korean J. Environ. Agric.*, 19(3):223-227.
- Moon, D.H., Cheong, K.H., Kim, T.S., Kim, J.H., Choi, S.B., Moon, O.R., Ok, Y.S., 2009. Stabilization of As in soil contaminated with chromated copper arsenate (CCA) using calcinated oyster shells, *Korean J. Environ. Agric.* 28(4), 378-385.
- Moon, D.H., Oh, D.Y., Lee, S.J., Park, J.H., 2010a. Stabilization of As contaminated soils using a combination of hydrated lime, portland cement, FeCl₃, 6H₂O and NaOH. *Korean J. Environ. Agric.* 29(1), 47-53.
- Moon, Y.H., Song, Y.G., Moon, H.S., Zhang, Y.S., 2010b. Mobility of metals in tailings using a column experiment from the guryong copper mine, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(3), 275-282.
- Nam, J.J., Lee, S.H., Kwon, S.I., Hong, S.Y., Lim, D.K., Koh, M.H., Song, B.H., 2004. Toxicity assessment of the soil by bioassay following a long-term application of sewage sludge, *Korean J. Environ. Agric.* 23(4), 258-263.
- Nicholson, F.A., Chambers, B.J., Alloway, B.J., 1997. Effect of soil pH on heavy metal Bioavailability. Proceedings of fourth international conference on the biogeochemistry of trace elements.
- Oh, W.K., 1981. Studies on the alleviation of heavy metal (*Cadmium*) damage through soil improvement I. extraction of cadmium and the damage through exchangeable Cd⁺⁺ by the application of soil amendments, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 14(4), 242-249.
- Oh, W.K., 1986. Effect of combined application of lime and organic matter, and of calcium silicate on the growth and cadmium content of chinese cabbage, *Korean J. Environ. Agric.* 5(1), 61-66.
- Oh, Y.T., Sedberry, J.E., 1974. Arsenic toxicity of rice and its interrelation with zinc, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 7(1), 43-47.
- Og, Y.S., Jeong, J.H., Lee, O.M., Im, S.G., Kim, J.G., 2003a. Surface complexation modeling of cadmium sorption onto synthetic goethite and quartz, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 36(4), 210-217.
- Og, Y.S., Kim, S.H., Kim, D.Y., Lee, H.N., Im, S.G., Kim, J.G., 2003b. Feasibility of phytoremediation for metal-contaminated abandoned mining area, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 36(5), 323-332.
- Ok, Y.S., Lim, S.K., Kim, J.G., 2003. The application of dual function organoclay on remediation of toxic metals and organic compounds in soil-water system, *Korean J. Environ. Agric.* 22(3), 177-184.
- Ok, Y.S., Kim, J.G., Yang, J.E., Kim, H.J., Yoo, K.Y., Park, C.J., Chung, D.Y., 2004. Phytoremediation of heavy metal contaminated soils using transgenic plants, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 37(6), 396-406.
- Paik, K.H., Kim, D.H., Yoon, S.L., 1996. Adsorption of heavy metal ions on bark(I), *Korean J. Environ. Agric.* 15(3), 391-398.
- Paik, K.H., Kim, D.H., Choi, D.H., 1997. Effect of light metal ions and competition among heavy metal ions during the adsorption of heavy metal ions by bark, *Korean J. Environ. Agric.* 16(2), 115-118.
- Paik, M.K., Kim, W.I., Yoo, J.H., Kim, J.K., Im, G.J., Hong, M.K. 2010a. A probabilistic assessment of human health risk from arsenic-contaminated rice grown near the mining areas of Korea, *J. Food Hyg. Safety* 25 (2), 143-147.
- Paik, M.K., Kim, W.I., Im, G.J., and Hong, M.K., 2010b. Childhood arsenic exposure and health risk

- assessment from rice cultivated near the mining areas in Korea, *J. Fd. Hyg. Safety* 25 (2), 148-152.
- Paik, M.K., Kim, M.J., Kim, W.I., Yoo, J.H., Park, B.J., Im, G.J., Park, J.E., Hong, M.K., 2010c. Determination of arsenic species in polished rice using a methanol-water digestion method, *J. Korean Soc. Appl. Biol. Chem.* 53(5), 634-638.
- Park, K.W., Hwang, S.K., Kim, Y.S., 1983. Studies on the pollution of heavy metal in vegetable crops grown in suburban area - part I, *Korean J. Environ. Agric.* 2(1), 13-17.
- Park, J.S., Shin, J.D., Han, S.S., Yoon, D.J., 2002. Phytoremediation technology with using water celery (*Oenanthe stolonifer DC.*) to clean up heavy metals in the contaminated wastewater, *Korean J. Environ. Agric.* 21(2), 122-129.
- Park, C.J., Yang, J.E., Ryu, K.R., Zhang, Y.S., Kim, W.I., 2004. Development of adsorbent for heavy metals by activation of the bark, *Korean J. Environ. Agric.* 23(4), 240-244.
- Park, C.J., Kim, W.I., Jeong, G.B., Lee, J.S., Ryu, J.S., Yang, J.E., 2006. Characteristics of heavy metal releases from the abandoned Dogog mine tailing in Korea, *Korean J. Environ. Agric.* 25(4), 316-322.
- Park, S.W., Yang, J.S., Ryu, S.W., Kim, D.Y., Shin, J.D., Kim, W.I., Choi, J.H., Kim, S.L., 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.
- Park, B.J., Lee, J.H., Kim, W.I., 2011. Influence of Soil Characteristics and Arsenic, Cadmium, and Lead Contamination on Their Accumulation Levels in Rice and Human Health Risk through Intake of Rice Grown nearby Abandoned Mines, *J. Korean Soc. Appl. Biol. Chem.* 54(4), 575-582.
- Rhim, T.J., 2003. The effects of selenium on cadmium-induced toxicity and lipid peroxidation in rat hepatocyte primary culture, *Korean J. Environ. Agric.* 22(2), 94-99.
- Rhim, T.J., Lim, S.C., 2005. The effects of onion extracts on mercury-induced toxicity and lipid peroxidation in rat hepatocyte primary culture, *Korean J. Environ. Agric.* 24(2), 146-152.
- Ryu, H.D., Lee, S.I., Kim, J.S., 2008. Effect of sludge age on the toxicity of Cr^{6+} , Zn^{2+} , and Cd^{2+} in INT-dehydrogenase assay, *Korean J. Environ. Agric.* 27(4), 382-388.
- Seo, K.W., Son, Y.W., Kim, R.H., Koo, J.W., Noh, N.J., Kyung, J.H., Kim, J.G., 2006. Vegetation distribution near abandoned metalliferous mines and seed germination properties of woody plants by the contaminated soils, *Korean J. Environ. Agric.* 25(1), 47-57.
- Seo, Y.J., Kang, Y.J., Choi, J., Kim, J.H., Park, M., 2008. Sorption of arsenate by the calcined Mg-Al layered double hydroxide, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 41(6), 369-373.
- Seo, Y.J., Choi, J., Kang, Y.J., Park, M., Kim, K.S., Lee, Y.H., Komarneni, S., 2010. Arsenic movement in the soils around a closed zinc mine, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(1), 51-59.
- Shagol, C.C., Chauhan, P.S., Kim, K.Y., Lee, S.M., Chung, J.B., Park, K.W., Sa, T., Exploring the potential of bacteria-assisted phytoremediation of arsenic-contaminated soils, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(1), 58-66.
- Shin, J.S., Choi, D.H., Seong, K.S., Kim, B.J., 1986. Copper (II) binding mechanisms with water soluble organic fractions extracted from sewage sludge amended soils, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 19(4), 307-314.
- Shi, H., Hudson, L.G., Liu, K.J., 2004. Oxidative stress and apoptosis in metal ion-induced carcinogenesis, *Free Radical Biol. Med.* 37, 582-593.
- So, K.H., Kim, B.Y., 1992. Studies on removal of heavy metals in irrigation water by water hyacinth. *Korean J. Environ. Agric.* 11(2), 133-139.
- Stevenson, F.G., 1994. *Humus chemistry: Genesis, composition, reactions*, 2nd Ed. John Wiley & Sons.
- Sun, X., Li, B., Li, X., Wang, Y., Xu, Y., Jin, Y., Piao, F., Sun, G., 2006. Effects of sodium arsenite on catalase activity, gene and protein expression in HaCaT cells, *Toxicol In Vitro* 20, 1139-1144.
- Yang, J.E., Shin, Y.K., Kim, J.J., Park, J., 1992. Application of principle in metal - ligand complexation to remove heavy metals : kind and concentration effects of organic ligands, *Korean J. Environ. Agric.* 11(3), 243-252.
- Yang, J.E., Shin, Y.K., Kim, J.J., 1993a. Application of principle in metal-ligand complexation to remove heavy metals : effects of metal concentration, pH and temperature, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 26(1), 37-42.
- Yang, J.E., Shin, Y.K., Kim, J.J., 1993b. Application of principle in metal-ligand complexation to remove heavy metals : time effects, *Korean J. Environ. Agric.* 12(1), 51-57.

- Yang, J.E., Lee, K.W., Kim, J.J., Lim, H.S., 1995. Changes of chemical species in soil solution induced by heavy metals, *Korean J. Environ. Agric.* 14(3), 263-271.
- Yang, J.E., Kim, H.J., Jun, S.H., 2001. Fractionation and pollution index of heavy metals in the sangdong tungsten mine tailings, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 34(1), 33-41.
- Yang, J.E., Kim, J.S., Ok, Y.S., Yoo, K.Y., 2005. Reduction efficiency of Cr(VI) in aqueous solution by different sources of zero-valent irons, *Korean J. Environ. Agric.* 24(3), 203-209.
- Yang, J.E., Lee, S.J., Kim, D.K., Oh, S.E., Yoon, S.H., Ok, Y.S., 2008. Effect of organic matter and moisture content on reduction of Cr(VI) in soils by zerovalent iron, *Korean J. Environ. Agric.* 27(1), 60-65.
- Yoo, S.H., Park, M.E., 1985a. Comparison of soil extractants for estimation of cadmium, zinc and lead in brown rice grown at paddy soils near old zinc-mining sites, *Korean J. Environ. Agric.* 4(1), 25-30.
- Yoo, S.H., Park, M.E., 1985b. Comparison of soil extractants for estimation of cadmium, Zinc and lead in brown rice collected from paddy soils near old zinc-mining sites, *Korean J. Environ. Agric.* 31-36.
- Yoo, S.H., Park, M.E., Ro, H.M., 1983. Cadmium, lead, and zinc accumulation in rice grown at paddy soils near old zinc-mining sites, *Korean J. Environ. Agric.* 2(1), 18-23.
- Yoo, S.H., Kim, K.H., Hyun, H.N., 1985. Sequential extraction of cadmium, zinc, copper and lead in soils near zinc-mining sites, *Korean J. Environ. Agric.* 4(2), 71-77.
- Yoo, S.H., Lee, J.R., Kim, K.H., 1995. Sequential extraction of Cd, Zn, Cu, and Pb from the polluted paddy soils and their behavior, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 28(3), 207-217.
- Yoo, S.H., Ro, K.J., Lee, S.M., Park, M.E., Kim, K.H., 1996. Distribution of cadmium, copper, lead, and zinc in paddy soils around an old zinc mine, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 29(4), 424-431.
- Yoo, K.Y., Cheong, Y.W., Ok, Y.S., Yang, J.E., 2005. Neutralization of pyrophyllite mine wastes by the lime cake by-product, *Korean J. Environ. Agric.* 24(3), 215-221.
- Yoo, K.Y., Ok, Y.S., Yang, J.E., 2006. Mechanism and adsorption capacity of arsenic in water by zero-valent iron, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 39(3), 157-162.
- Yoo, K.Y., Ok, Y.S., Yang, J.E., 2007. As(5) immobilization in an aqueous solution by zerovalent iron under various environmental conditions, *Korean J. Environ. Agric.* 26(3), 197-203.
- Yoo, R.B., Kim, H.J., Lee, S.E., Lee, M.S., Woo, S.H., Choi, J.S., Baek, K.T., Chung, K.Y., 2011. Effects of environmental factors and heavy metals on the growth and phosphorus removal of *Alcaligenes sp.*, *Korean J. Environ. Agric.* 30(2), 216-222.
- Yoon, J.H., 1998. Soil chemistry, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 31(S. I.), 45-55.
- Yoon, C.G., Kwon, T.Y., 1999. A comparative measurement of Pb and Cd with different pretreatment. *Korean J. Environ. Agric.*, 18(2), 109-115.
- Yun, S.G., Jung, G.B., Kim, W.I., Lee, J.S., Kim, M.K., Kim, J.H., Shin, J.D., Lee, D.B., Kim, S.C., 2008. Evaluation on the fate of Cd in soil and plant by using stable isotope methodology, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 41(3), 223-227.
- Yun, E.S., Park, S.H., Ko, J.Y., Jung, K.Y., Park, K.D., Hwang, J.B., Park, C.Y., 2010. Vertical distribution of the heavy metal in paddy soils of below part at guundong mine in milyang, Korea, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(5), 590-595.
- Yun, S.W., Kang, S.I., Jin, H.G., Kim, H.J., Lim, Y.C., Yi, J.M., Yu, C., 2011. An investigation of treatment effects of limestone and steel refining slag for stabilization of arsenic and heavy metal in the farmland soils nearby abandoned metal mine, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(5), 734-744.