

유비철석 입자 혼합 토양내 상추(*Lactuca sativa* L.)의 비소이온 흡수와 축적

심호영 · 이교석 · 이동성 · 전대성 · 신지수 · 김수빈 · 조진웅 · 정덕영[†]

충남대학교 농업생명과학대학

Uptake and Accumulation of Arsenate on Lettuce (*Lactuca sativa* L.) Grown in Soils Mixed with Various Rates of Arsenopyrite Gravel

Ho-Young Shim, Kyo-Suk Lee, Dong-Sung Lee, Dae-Sung Jeon, Ji-Su Shin, Soo-Bin Kim, Jin-Woong Cho, and Doug-Young Chung[†]

College of Agricultural and Life Sciences, Chungnam Natl. University, Daejeon 305-764, Korea

ABSTRACT Arsenic (As) is nonessential element toxic to plants. In Korea little is not only known about the extent of actual anthropogenic sources and inputs of arsenic to the agricultural land which plays a active role as a sink, but also systematic research on arsenic as an toxic element entering the food chain via the soil-plant pathway has not been investigated in the fields and greenhouses besides in few places of abandoned mining sites. Therefore, it is important to focus on the effect of As-contaminated soils on As uptake and biomass production of lettuce plants. In this study, As concentrations in the soil and accumulation of As in lettuce transferred by As uptake from soils were investigated. To do this, soil which was mixed with various rates of arsenopyrite gravels containing arsenic from 0 to 100% was packed into a round plastic pot. Then, 10 days old vegetable crops of chinese cabbage and lettuce after germination were transplanted into a pot. Growth of lettuce was observed for four weeks with one week interval. All experiments were done by triplicate. The results showed that the growth rates for number of leaves, width and length of the crop plants were retarded with increasing amount of gravel mixed due to increasing bioavailable amount of arsenate with increasing rate of gravel in soils. With these results, we conclude that the bioavailable amount of arsenate can influence the growth of lettuce.

Keywords : uptake, accumulation, arsenate, lettuce

중금속과 같은 유해한 오염물질의 농업생태계 내 유입증가는 농작물의 생육뿐만 아니라 국민의 건강을 위협하는 사

회적 문제로 대두되고 있다. 이에 따라 국제기구에서도 중금속 함량을 기준한 농산물의 안전성에 관련한 각종 오염물질에 대한 규제를 강화하고 있다. 우리나라의 경우 농경지 중금속 오염은 비산먼지에 의한 대기오염뿐만 아니라 산업화에 따른 공단지역의 확장 및 산업의 다양화, 그리고 폐급속광산 등에서 유출되는 각종 폐수, 폐기물 및 침출수 등에 의해 발생하고 있는 것으로 보고되고 있다(Kim *et al.*, 2012). 이러한 김 등(Kim *et al.*, 2012)이 보고한 바에 따르면 산업지역 인접 토양이나 광산지역 광나 광산폐수 유입 또는 중금속으로 오염된 하천수를 농업용수로 사용하는 지역에서 중금속오염 물질의 유입으로 농경지 중금속 오염은 농작물의 생육피해와 안전성에 심각한 영향을 미치는 것으로 나타나고 있다. 토양 내 중금속과 식물과의 반응은 식물체로 전이되는 양은 적으나 생육의 피해를 유발하는 비소 등과 중금속의 흡수 방어기작에 영향을 받지 않고 식물에 전이되는 카드뮴 등이 알려져 있다(Jung *et al.*, 2011). 이러한 특징은 토양 내 중금속 유효도와 식물로의 흡수-이행성이 토양 내 중금속 농도, 농작물의 특성과 토양의 이화학특성에 따라 상이하게 나타난다(Jung *et al.*, 2006).

Pyrite의 경우 비소를 수반하는 광물로 알려져 있으며, 유비철석내 비소함량은 중량비로 약 43% 정도 함유하고 있는 것으로 조사되었다. Asta *et al.* (2010) 발표한 연구에 따르면 비소를 포함하는 유비철석(Arsenopyrite)으로부터의 비소용해량($\text{mol m}^{-2} \text{S}^{-1}$)은 단위 중량당 입자표면적과 비례하며 반면 pH와 비소의 용해도는 반비례 관계를 보인다. 따라서 pH가 증가하고 단위 중량당 표면적이 감소하면 유비철

[†]Corresponding author: (Phone) +82-42-821-6739 (E-mail) dychung@cnu.ac.kr

<Received 13 September 2014; Accepted 13 October 2014>

석(Arsenopyrite)으로부터 비소의 용해량은 감소한다. 한편 정(2012)이 조사한 바에 따르면 유비철석으로 용해되는 비소량은 입경이 감소함에 따라 또한 수분과의 접촉시간이 증가함에 따라 용해되어 수용성 상태로 존재하는 비소의 양이 증가하는 것으로 보고되었다(Kim *et al.*, 2012; Williams, 2001; Lazareva *et al.*, 2002; Smedley and Kinniburgh, 2002; Casiot *et al.*, 2003; Frau and Arda, 2003; Welch and Stollenwerk, 2003; Lee *et al.*, 2005; Pfeifer *et al.*, 2007).

토양내에서 비소의 형태는 토양 pH 조건에 따라 달라지며 한편 이러한 비소형태의 이동에 영향을 미치는 요인은 토양 pH, 황산과 인산이온의 존재 여부, 석회석의 유무에 따라 토양내에서 비소이온의 이동 특성이 달라진다. 비소는 산화(oxic) 또는 호기상태에서는 5개로 존재하지만 환원 또는 무산소(anoxic)상태에서는 3개로 존재하는데 3개의 비소가 5개의 비소보다 매우 독성이 크다. 한편 토양내 존재 형태 별 용해도를 비교하여 보면 토양 pH가 증가함에 따라 Ca 형태를 제외한 대부분의 비소의 용해도는 증가한다(Breed *et al.*, 1997; Ruitenber *et al.*, 1999; McGuire *et al.*, 2001; Craw *et al.*, 2003; Yu *et al.*, 2004, 2007; Tallant and McKibben, 2005; Walker *et al.*, 2006; McKibben *et al.*, 2008).

이러한 토양 중금속함량과 식물로의 전이를 평가하는 방법으로 토양 내 중금속 함량, 유효태 중금속 함량 및 존재 형태에 따른 중금속 함량 중 가용성 함량의 비를 식물체 내 중금속 함량과 비교하고 있다(Kim *et al.*, 2012).

재료 및 방법

비소가 함유된 골재를 토양에 토양개량제로 사용하였을 경우 광미에 포함된 유효태 또는 광물로 존재하는 비소가 용출되어 토양내에서 식물체로 전이되어 비소의 양과 식물 생육에 미치는 영향을 조사하기 위해 실험실내에서 와그너 포트 시험으로 연구를 수행하였다.

비소가 함유된 유비철석 시료는 현재 농경지토양 객토 또는 복토용으로 사용되는 직경이 0.6~3.35 mm 이하인 자갈에 해당하는 입자를 채취한 후 증류수로 세척한 후 풍건하였으며 한편 발토양은 충남대학교 실습포장에서 고추 등이 재배되었던 토양에서 표층토 30 cm를 채취하여 풍건 후 Wiley Mill로 분쇄한 다음 2 mm 체를 통과한 시료를 이용하였다. 시험에 사용된 논토양의 이화학적은 일반화학분석법(NIAST, 2000)으로 분석하였다. pH (ATI ORION EA940) 및 EC (Thermo ORION 3STAR)는 토양과 증류수의 비율을 1 : 5로 하여 측정하였으며, CEC와 유기물은 각각 Ammonium acetate exchange법(NIAST, 2000)과 Walkley Black법(Allison 1965)으로 조사하였다(Table 1). 그리고 시험에 사용한 발토양과 유비철석에 함유된 전체 중금속은 HF-HNO₃-HClO₄ 용액으로 완전히 분해한 후 비소를 포함 중금속 함량을 조사하였다(Table 2).

비소전이를 조사하기 위한 토양시료는 토양 대 자갈의 비율을 0%에서 100% 범위내에서 7단계로 구분하여 혼합 한

Table 1. Physical and chemical properties of upland soils and gravel used in the experiment.

Category	pH (1:5)	EC (dS m ⁻¹)	OM (%)	CEC (cmol kg ⁻¹)	Remarks
Upland soil	6.23	0.29	0.98	6.21	Sandy loam (Clay : 13.8%)
Gravel	9.61	0.63	< 0.01	2.95	Particle size : 0.6 ~ 3.35mm

Table 2. Concentrations (mg kg⁻¹) of heavy metals in arsenopyrite and soils used in the experiment.

Samples	As	Cd	Cu	Pb	Zn
Upland soils	ND	ND	7.13 ± 0.54	6.67 ± 3.41	37.41 ± 24.02
Arsenopyrite	95.28 ± 88.05	2.32 ± 0.25	8.19 ± 13.52	32.98 ± 8.95	134.34 ± 50.70

ND : Not detected; SD : Standard deviation

Table 3. Treatments of mixing ratios between upland soils and gravel as dry weigh basis for uptake of As by vegetable crops used in the experiment.

Category	Treatments (Upland soil : Gravel, wt wt ⁻¹)						
	1	2	3	4	5	6	7
Ratio	Control(100:0)	90:10	70:30	50:50	30:70	10:90	0:100

후(Table 3) 직경 250 mm 와그너포트에 높이 20 cm 높이로 자연 낙하방식으로 충진 후 발아 후 10일째 적축면 상추묘(*Lactuca sativa* L. ‘선망적축면’, (주)농우바이오)를 포트당 3주씩 이식하여 4주간 생육 조사를 실시하였다(Fig. 1). 관수는 충진된 토양의 포화수분함량을 기준하여 용적수분함량을 약 55% 정도로 유지하기 위하여 매일 일정량의 증류수를 Spray Nozzle을 이용하여 관수하였다. 모든 시험구는 3반복으로 실시하였다.

상추의 생육조사는 4주간 생육 후 엽수, 엽장, 엽폭, 엽록소함량과 4주 후 식물체를 채취하여 생체중과 조사한 다음 Dry Oven의 온도를 80°C로 유지하면서 72시간 동안 건조 후 건조중을 조사하였다. 이와 같이 건조한 식물체를 시료를 Ball Mill (Planetary Ball Mill PM 200, Retsch USA)로 미세 분말로 분쇄한 균질화한 시료는 약 2 g을 Microwave 용 teflon vessel에 취하고 62% 질산 7~8 mL, 과산화수소 2~3방울을 넣고 Microwave digestion system (ETHOS, Milestone, Italy)으로 200°C에서 20분간 분해하였으며, 분해 후, 증류수를 사용하여 정량플라스크를 이용해서 20 mL 까지 정용하고 여과(0.45 μ m)하여 시험용액으로 하였다. 비소함량은 ICP (ICP-OES Agilent Technology 720, USA)로 조사하였다.

결과 및 고찰

Table 2에서 보는 바와 같이 본 시험에 사용한 발토양과 유비철석 함유된 내 중금속 함량을 조사한 결과 공시토양에서는 비소와 카드뮴은 검출되지 않았으나 본 연구에서 사용한 중세사에서 자갈크기의 유비철석 입자시료에서는 비소가 약 95.28 mg kg⁻¹ 정도 함유된 있는 것으로 조사되었다. 이는 우리나라 토양환경보존법 토양오염공정시험기준 1지역기준 토양오염대책기준 75.0 mg kg⁻¹을 초과하는 것으로 조사되었다.

Table 4는 사질양토 토양에 혼합한 중세사부터 자갈크기에 해당하는 유비철석입자 혼합비율에 따른 토양 전체, 생물학적 이용 가능 비소, 그리고 상추로 전이된 비소의 양을 조사한 것이다. 표에서 보는 바와 같이 중세사부터 자갈크기에 해당하는 유비철석입자비율이 증가함에 따라 상추가 이식된 토양전체에 포함된 비소량은 상대적으로 증가할 뿐만 아니라 유비철석입자에서 유래된 생물학적 이용 가능 비소의 양도 상대적으로 증가되어 토양에 치환성 또는 수용성 상태로 존재함을 알 수 있었다. 따라서 가용화되는 비소 함량이 증가됨에 따라 최종 40일째 수확한 상추에서 조사된 비소의 함량도 증가하는 것으로 조사되었다. 한편 상추 재

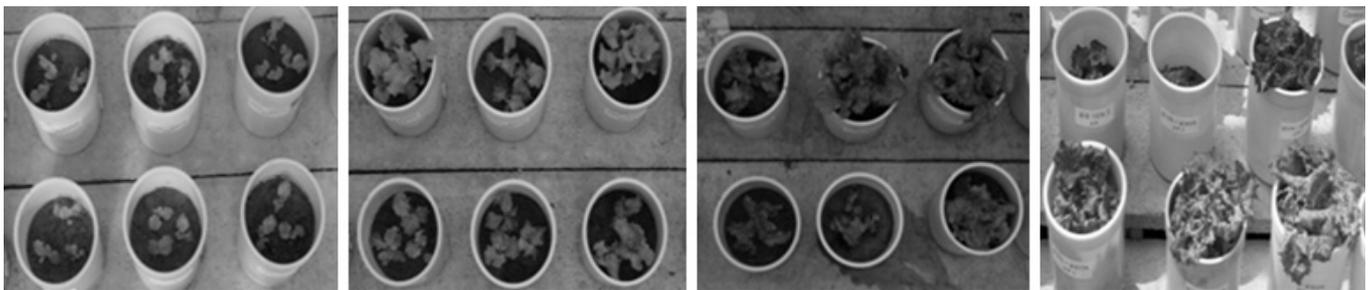


Fig. 1. Pictures of lettuce growing in the wagner pot packed with mixture of upland soils and various rates of arsenopyrite gravel (left to right : after transplant to 3 weeks grown).

Table 4. Amount of total and bioavailable arsenic in soils and the relative concentration of arsenic in lettuce leaves uptaken.

Treatments	Soil		Lettuce (C)	(B/A) (%)	(C/A) (%)	(C/B) (%)
	Total (A)	Bioavailable (B) (mg kg ⁻¹)				
100 : 0	ND	ND	ND	0	0	0
90 : 10	8.093	0.178	0.009	2.20	0.11	5.06
70 : 30	39.524	1.057	0.021	2.67	0.05	1.99
50 : 50	46.367	1.306	0.045	2.82	0.10	3.45
30 : 70	67.431	1.485	0.083	2.20	0.12	5.59
10 : 90	81.630	2.705	0.130	3.31	0.16	4.81
0 : 100	96.218	2.868	0.155	2.98	0.16	5.40

배토양에 함유된 양을 기준으로 생물학적 이용 가능 비소와 그리고 상추로 전이된 비소의 양의 비율을 비교한 결과 토양으로부터 생물학적 이용 가능 비소 형태로 전환된 비소의 비율은 최저 2.20%에서 최대 3.31%로 조사되었으며 토양에 함유된 양을 기준 시 상추로 전이된 비소의 양은 최저 0.1%에서 최대 0.16% 정도 상추로 전이된 것으로 조사되었다. 그리고 유비철석으로부터 유리된 생물학적 이용 가능 비소 형태가 상추로 전이된 비율은 최저 1.99%에서 최대 5.59%로 생물학적 이용 가능한 형태의 비소가 더 높은 비율로 상추로 전이됨을 알 수 있었다.

비소의 전이계수는 각각의 농작물이 재배되는 토양의 토성, 토양의 이화학적 특성, 토양 내 중금속 함량, 존재형태, 결합능, 그리고 각 농산물의 생리적인 특징에 따라 결정된다(Zeng *et al.*, 2012). 한편 국내에서는 중금속의 전이계수는 대부분 USEPA, UKEA, RIVM에서 조사된 전이계수값을 사용하고 있으며, 엽채류의 경우 비소의 전이 계수는 USEPA 0.036, UKEA 0.009, RIVM 0.03으로 적용하고 있다(Lee *et al.*, 2009). 본 연구 결과에서 조사된 비소의 전이계수를 비교하여 보면 전이된 최대 전이계수는 USEPA가 제시한 0.036 보다는 다소 높으며 또한 최소전이량을 기준하여 조사된 1.99%는 UKEA가 제시한 0.009 보다는 높은 것으로 조사되었다.

비소가 전혀 검출되지 않은 사질양토인 발토양과 비소가 함유된 입자직경이 0.6~3.35 mm인 자갈을 100%에서 0%까지 7단계로 혼합한 토양에 발아 후 10일 정도 자란 상추를 이식한 후 생육조사를 실시한 결과 상추의 최대 엽장은 (Fig. 2) 자갈의 혼합비율이 30% 이상 증가함에 따라 최대 엽장이 급격히 감소하는 것으로 조사되었다. 특히 자갈이

10% 혼합된 토양은 발토양 100%인 처리구와 유사한 생육 특성을 보여주었으나 자갈함량이 50% 이상 혼합된 토양에서는 상추생육이 급격히 지연되는 특징을 보이고 있으며 또한 자갈 100% 구에서는 40일째 처리구 모두에서 생육이 정지하거나 고사하는 것으로 조사되었다. 특히 모래혼합비율이 100% 이상인 경우 최대 엽장은 40일째 5.8 cm로 비소가 함유되지 않은 대조구 17.9 cm와 비교 시 약 32.4% 수준으로 급격하게 저하되는 경향을 보였다. 이는 입자직경이 토양보다 큰 모래 또는 자갈크기의 비소를 포함한 자갈이 혼합량이 증가됨에 따라 식물가용수분함량이 감소될 뿐만 아니라 상추가 자라는 동안 비소를 포함한 유비철석으로부터 비소가 토양내로 용존되어 작물체내로 전이되기 증가되어 상추 생육에 영향을 준 것으로 판단한다.

처리구별 각각의 최대엽폭 변화를 조사한 결과 상추의 엽폭과 엽장의 생육은 정의 상관관계를 보여주었으며 조사 기간 중 처리수별 최대엽장의 길이 변화와 마찬가지로 혼합되는 자갈의 비율이 증가됨에 따라 최대엽폭도 감소하는 경향을 보였다(Fig. 3). 그러나 최대 엽장의 경우 자갈혼합비율이 30% 이상에서 최대엽장이 급격하게 감소하는 경향을 보인 반면 최대엽폭은 진적으로 감하는 경향을 보였다. 한편 Fig. 3에서 보는 바와 같이 모래혼합비율이 90% 이상인 경우 최대 엽폭은 40일째 7.1 cm로 비소가 함유되지 않은 대조구 17 cm와 비교 시 약 36.5% 수준으로 급격하게 저하되는 경향을 보였다. 따라서 상추 최대엽폭의 감소는 유비철석 자갈입자에 함유된 비소가 용해되어 상추의 생육저해로 나타난 것으로 판단한다.

엽수의 경우 유비철석 모래 혼합비율이 증가함에 따라 생

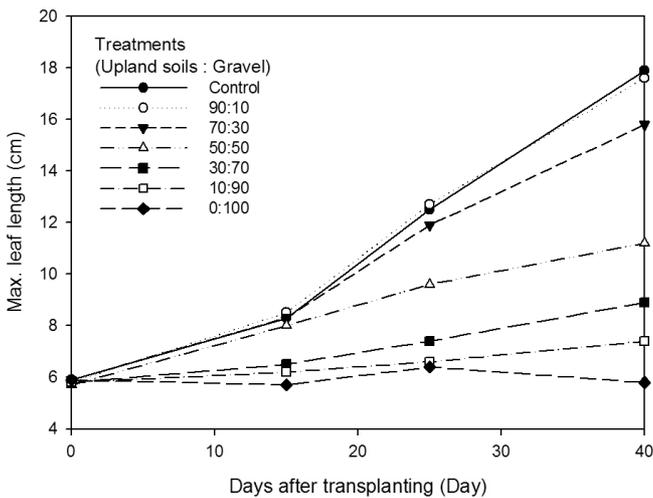


Fig. 2. Changes in maximum leaf lengths of the lettuce grown in soils mixed with different rates of arsenopyrite gravel.

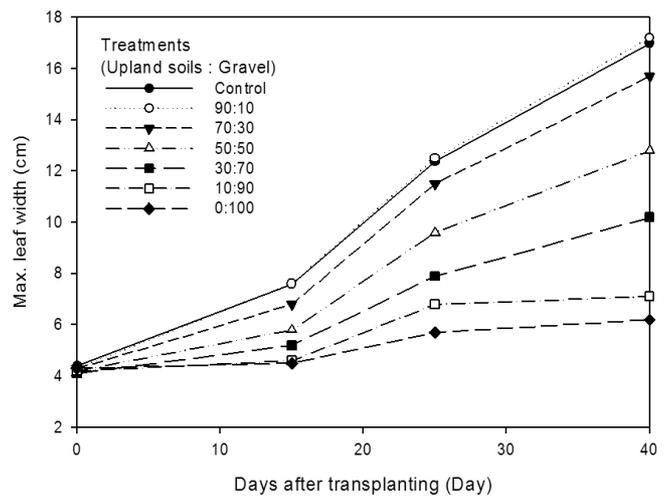


Fig. 3. Changes in maximum leaf widths of the lettuce grown in soils mixed with different rates of arsenopyrite gravel.

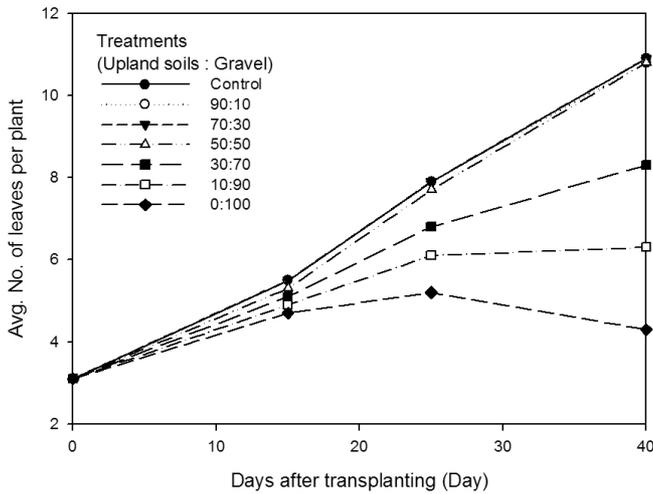


Fig. 4. Changes in average number of lettuce leaves grown in soils mixed with different rates of arsenopyrite gravel.

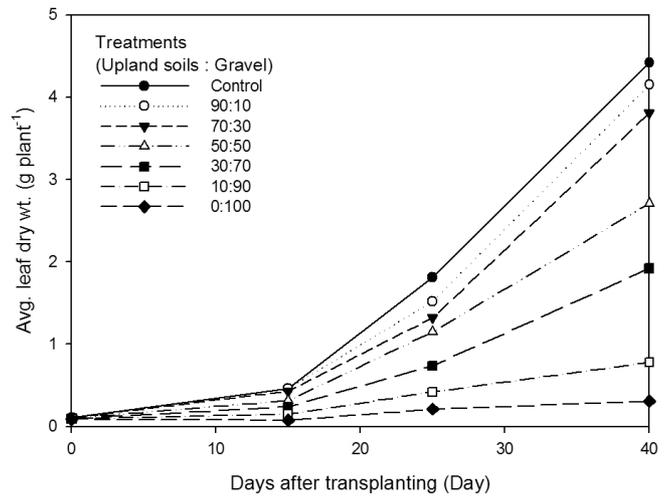


Fig. 6. Changes of average leaf dry weight of the lettuce grown in soils mixed with different rates of arsenopyrite gravel.

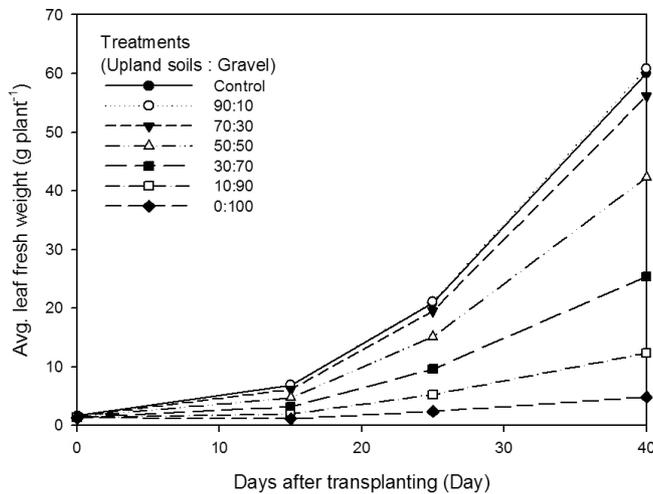


Fig. 5. Changes of average fresh weight of the lettuce leaves grown in soils mixed with different rates of arsenopyrite gravel.

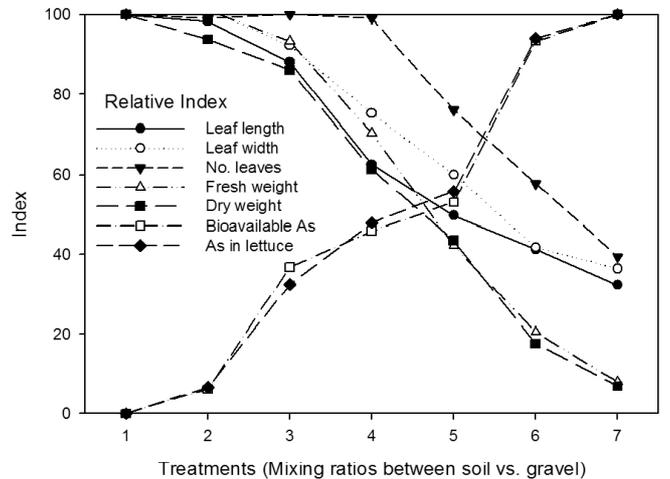


Fig. 7. Comparison of relative growth indexes of the lettuces and As as bioavailable in soils and recovered from the lettuces. The relative growth index and the relative As index were calculated by the maximum values of the 40 days old lettuce and As in a given condition.

육 40일째 4.3대로 대조구 10.9개의 약 39.4%에 해당한다 (Fig. 4). 특히 모래혼합비율 100%의 경우 엽수는 25일째까지는 다소 증가하는 경향을 보였으나 40일째에는 25일째 평균 5.2엽에서 4.3엽으로 감소하는 것으로 조사되었다. 이와 같이 상추는 유비철석의 모래혼합비율이 증가함에 따라 엽수 발생량 감소뿐만 아니라 40일째에서 보는 바와 같이 발생한 엽이 고사하여 엽수가 감소하는 것으로 조사되었다. 따라서 유비철석모래에서 유래한 비소는 상추의 생육 지연뿐만 아니라 상추엽의 고사의 원인으로 작용하는 것으로 판단된다.

Fig. 4와 5는 생육기간별 상추의 생체중과 건물중을 조사

한 결과다. 조사 결과 상추의 생체중과 건물중 모두 생육기간이 증가함에 따라 감소하는 것으로 조사되었다. 40일째 상추 1구의 생체중과 건물중은 대조구 생체중과 건물중의 각각 8.1%와 7.0%로 조사되었으며 이는 상추의 최대엽장과 최대엽폭의 상대생육비율보다 낮은 것으로 조사되었다. 이와 같은 생체중과 건물중은 생육기간이 증가함에 따라 엽 발생량 감소뿐만 아니라 자라던 엽의 고사 등에 기인하는 것으로 판단한다.

따라서 이와 같은 비소에 의한 상추생육을 비교 평가하기 위하여 40일째 생육특성을 대조구 생육특성과 비교한 생육

지수와 조사된 최대 생물학적 이용 가능 비소와 상추내에서 조사된 비소 양을 기준하여 평가한 비소 지수간의 상관특성을 조사하였다(Fig. 7). 비교 결과 상대적 생물학적 이용 가능 비소와 상추내 비소 지수는 정의 상관관계를 보이고 있는 반면 이의 비소 지수가 증가함에 따라 상추의 엽장, 엽폭, 엽수, 생체중과 건물중 모두 반비례로 감소하는 것으로 조사되었다. 따라서 상추의 생육은 토양에 혼합된 비소를 포함하고 있는 유비철석입자에서 유래한 비소에 영향을 받았음을 알 수 있다.

적 요

비소 함유 골재를 토양개량제로 사용하였을 경우 광미에 포함된 유효태 또는 광물로 존재하는 비소가 용출되어 식물 생육에 미치는 영향을 조사하기 위해 실험 한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 중세사에서 자갈크기의 유비철석 입자시료에서는 비소가 약 95.28 mg kg^{-1} 정도 함유된 있으나 밭토양 시료에서는 비소가 없는 것으로 조사되었다.
2. 상추 재배토양에 함유된 양을 기준으로 생물학적 이용 가능 비소와 그리고 상추로 전이된 비소의 양의 비율을 비교한 결과 토양으로부터 생물학적 이용 가능 비소 형태로 전환된 비소의 비율은 최저 2.20%에서 최대 3.31%로 조사되었다.
3. 상대적 생물학적 이용가능 비소와 상추내 비소 지수는 정의 상관관계를 보이고 있는 반면 이의 비소 지수가 증가함에 따라 상추의 엽장, 엽폭, 엽수, 생체중과 건물중 모두 반비례로 감소하는 것으로 조사되었다.
4. 입자직경이 토양보다 큰 모래 또는 자갈크기의 비소를 포함한 자갈이 혼합량이 증가됨에 따라 식물가용수분 함량이 감소될 뿐만 아니라 상추가 자라는 동안 비소를 포함한 유비철석입자부터 비소가 토양내로 용존되어 작물체내로 전이기 증가되어 상추 엽장, 엽폭, 엽수, 생체중, 그리고 건물중에 영향을 준 것으로 판단한다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 국립식량과학원 농업과학기술개발 프로그램(과제 번호 PJ009302012013) 지원에 의해 수행되었습니다.

인용문헌(REFERENCES)

- Allison, L. E., 1965. Organic carbon, in: Black C.A. (Eds), Methods of Soil Analysis. Part II. Am. Soc. Agron. Inc. Publ., Madison, WI, 1367-1376.
- Asta, M. P., C. Jordi, A. Carlos, A Patricia, and D. G. Giovanni. 2010. Arsenopyrite dissolution rates in O₂-bearing solutions Chemical Geology 273 (2010) 272-285 Williams, M., 2001. Arsenic in mine waters: an international study. Environ. Geol. 40 : 267-278.
- Breed, A. W., S. T. L. Harrison, and G. S. Hansford. 1997. A preliminary investigation of the ferric leaching of a pyrite/arsenopyrite flotation concentrate. Miner. Eng. 10 : 1023-1030.
- Casiot, C., M. Leblanc, O. Bruneel, J. C. Personne, K. Koffi, and F. O. Elbaz-Poulichet. 2003. Geochemical processes controlling the formation of As-rich waters within a tailings impoundment (Carnoulès, France). Aquat. Geochem. 9 : 273-290.
- Craw, D., D. Falconer, and J. H. Youngson. 2003. Environmental arsenopyrite stability and dissolution: theory, experiment, and field observations. Chem. Geol. 199 : 71-82.
- Frau, F., and C. Arda. 2003. Geochemical controls on arsenic distribution in the Bacca Locci stream catchment (Sardinia, Italy) affected by past mining. Appl. Geochem. 18 : 1373-1386.
- Jeong, S. k., J. S. An, Y. J. Kim, G. H. Kim, S. I. Choi, and K. P. Nam. 2011. Study on Heavy Metal Contamination Characteristics and Plant Bioavailability for Soils in the Janghang Smelter Area. J. Soil & Groundwater Env. Vol. 16(1) : 42-50.
- Jung, G. B., W. I. Kim, J. S. Lee, J. D. Shin, J. H. Kim, and J. T. Lee. 2006. Availability of Heavy Metals in Soil and Their Translocation to Water Dropwort (*Oenanthe javanica* DC.) Cultivated near Industrial Complex. Korean J. Environ. Agric. Vol. 25(4) : 323-330.
- Kim, J. Y., J. H. Lee, K. Anitha, D. W. Kang, and M. J. Kim, J. H. Yoo, D. H. Kim, Y. J. Lee, and W. I. Kim. 2012. Transfer Factor of Heavy Metals from Agricultural Soil to Agricultural Products. Korean J. Environ. Agric. Vol. 31(4) : 300-307.
- Lee, J. H., J. Y. Kim, W. R. Go, E. J. Jeong, K. Anitha, G. B. Jung, D. H. Kim, and W. I. Kim. 2012. Current research trends for heavy metals of agricultural soils and crop uptake in Korea. Korean J. Environ. Agric. Vol. 31(1) : 75-95.
- Lazareva, E. V., O. V. Shuvaeva, and V. G. Tsimbalist. 2002. Arsenic speciation in the tailings impoundment of a gold recovery plant in Siberia. Geochem. Explor. Environ. Anal. 2 : 263-268.
- Lee, M. H., T. S. Kim, M. S. Lee, Y. J. An, J. Y. Lee, J. Y. Yang, H. M. Lee, M. J. Kim, J. W. Park, K. K. Lee, S. W. Jung, K. P. Nam, H. L. Roo, S. I. Choi, and I. L. Ko. 2009. Risk Assessment of Soil. Dongwha Technology, Korea. p. 116-118.
- Lee, P. K., M. J. Kang, S. H. Choi, and J. C. Touray. 2005. Sulphide oxidation and the natural attenuation of arsenic and trace metals in the waste rocks of the abandoned Seobo

- tungsten mine, Korea. *Appl. Geochem.* 20 : 1687-1703.
- McGuire, M., J. F. Banfield, and R. J. Hamers. 2001. Quantitative determination of elemental sulphur at the arsenopyrite surface after oxidation by ferric iron: mechanistic implications. *Geochem. Trans.* 2 : 25-29.
- McKibben, M. A., B. A. Tallant, and J. K. D. Angel. 2008. Kinetics of inorganic arsenopyrite oxidation in acidic aqueous solutions. *Appl. Geochem.* 23 : 121-135.
- NAIST, 2000. Method of soil and plant analyses, National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea.
- Pfeifer, H. R., A. Häussermann, J. C. Lavanchy, and W. Halter. 2007. Distribution and behavior of arsenic in soils and waters in the vicinity of the former gold-arsenic mine of Salanfe, Western Switzerland. *J. Geochem. Explor.* 93 : 121-134.
- Ruitenbergh, R., G. S. Hansford, M. A. Reuter, and A. W. Breed. 1999. The ferric leaching kinetics of arsenopyrite. *Hydrometallurgy* 52 : 37-53.
- Smedley, P. L., and D. G. Kinniburgh. 2002. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Appl. Geochem.* 17 : 517-568.
- Tallant, B. A., and M. A. McKibben. 2005. Arsenic mineral kinetics: arsenopyrite oxidation. *Geochim. Cosmochim. Acta* 69, A820.
- Yu, Y., Y. Zhu, Z. Gao, C. H. Gammons, and D. Li. 2007. Rates of arsenopyrite oxidation by oxygen and Fe(III) at pH 1.8-12.6 and 15-45. *Environ. Sci. Technol.* 41 : 6460-6464.
- Yu, Y., Y. Zhu, A. E. Williams-Jones, Z. Gao, and D. Li, , 2004. A kinetic study of the oxidation of arsenopyrite in acidic solutions: implications for the environment. *Appl. Geochem.* 19 : 435-444.
- Walker, F. P., M. E. Schreiber, and J. D. Rimstidt. 2006. Kinetics of arsenopyrite oxidative dissolution by oxygen. *Geochim. Cosmochim. Acta* 70 : 1668-1676.
- Welch, A. H., and K. G. E. Stollenwerk. 2003. *Arsenic in Ground Water: Geochemistry and Occurrence*. Kluwer Academic Publishers.
- Zeng, F., S. Ali, H. Zhang, Y. Ouyang, B. Qui, F. Wu, and G. Zhang. 2012. The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants, *Environ. Pollut.* VOL59(1) : 84-91.