

土壤中 砒素의 行動과 水稻의 砒素吸收에 依한 被害 生理 生態에 관한 研究

IV. 水耕試驗에서 砒素處理가 水稻의 蒸散, 氣孔抵抗性 및 葉의 溫, 濕度에 미치는 影響

李 敏 孝** · 林 秀 吉* · 金 福 榮**

(1987. 2. 5 접수)

Behaviors of Arsenic in Paddy Soils and Effects of Absorbed Arsenic on Physiological and Ecological Characteristics of Rice Plant

IV. Effect of As content in water culture on transpiration, stomatal
resistance, temperature and humidity in the leaves of rice plant

Min Hyo Lee,** Soo Kil H. Lim* and Bok Young Kim**

Summary

A water culture experiment was conducted to investigate the effect of As content in a culture solution on the water status and growth of rice plants. Rice (*Oryza sativa* L. Line. Iri 316) seeds were germinated in bentonite and cultivated there for 30 days. Rice seedlings were transplanted into 3.5l pots containing the culture solution on May 1, 1985 and allowed to grow without As treatment for one month. Afterwards, they were grown in a culture solution maintaining the final concentration of As, 0, 1, 5, 10 and 15 mg/l renewing in the solution dissolved sodium arsenate at intervals of 3 to 7 days. Plants were cultivated in the green house during the growing period and harvested 60 days after As treatment.

The results obtained were as follows:

Transpiration of rice plants was decreased with the increase of the As level in the culture solution. Stomatal diffusive resistance and leaf temperature increased with increase of As levels though the humidity and the air flow rate in leaf decreased.

Air flow rate, transpiration and stomatal diffusive resistance showed a highly significant correlation with As contents in shoots and roots of rice plants: Espally The air flow rate and transpiration revealed a significantly higher correlation with As contents in the root than that in

* 高麗大學校 農科大學(College of Agriculture, Korea Univ., Seoul, Korea)

** 農業技術研究所(Agricultural Sciences Institute, Suweon, Korea)

the shoot, but diffusive resistance showed adverse tendency.

High levels of As in the culture solution depressed plant height, no. of tillers, leaf width and dry weight of plant remarkably. Typical symptoms of As toxicity were root discoloration, and necrosis of leaf tips and margins, and leaf rolling during the sunny daytime were also another symptoms.

結 論

砒素는 産業的으로 農藥, 防腐劑의 主劑로, 硝子類 製造時 添加劑 等으로 有用하게 活用되고 있으나 作物에 對한 毒性은 有害 重金屬元素를 보다 강한 것으로 報告되고 있으며^(1,2,3) 人畜에도 有害한 元素로 알려져 있다.^(4,5)

作物에 對한 砒素被害는 카드뮴, 銅, 鉛과 같은 重金屬元素와 같이 植物에 吸收되던 大部分이 根에 蓄積^(2,6)됨으로써 水分 및 養分의 吸收을 阻害시켜 生育障害를 일으킨다.

砒素吸收에 依한 植物의 水分障害는 一部 研究者들에 依해 植物의 水分消耗 程度와 被害症狀等^(1,3)에 依해 確認되어져 왔으나 植物의 砒素吸收에 따른 體內水分狀態에 關與하는 諸要因과의 關係에 대해서는 거의 報告된 바 없다.

따라서 本 研究는 砒素處理에 依한 水分의 吸收樣相을 究明하기 爲하여 水耕試驗으로 砒素濃度를 달리하여 水稻를 栽培하고 砒素處理濃度別 水稻葉의 蒸散量, 氣孔抵抗性, 空水流入量 및 植物體中 砒素含量, 뿌리 및 잎의 被害症狀等을 調査하였다.

材料 및 方法

1. 水耕栽培方法

水耕栽培를 위한 表準培養液의 調製는 IRRI 液⁽⁷⁾에 農業技術研究所 地下水(表 1)를 使用하였으며 그 組成은 $N(NH_4NO_3)$ 40 ppm, $P(NaH_2PO_4 \cdot 2H_2O)$ 10 ppm, $K(K_2SO_4)$ 40 ppm, $Ca(CaCl_2)$ 40 ppm, $Mg(MgSO_4 \cdot 7H_2O)$ 40 ppm 이다. 또한 微量元素으로써 $Mn(MnCl_2 \cdot 4H_2O)$ 0.5 ppm, $Mo[(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O]$ 0.05 ppm, $B(H_3BO_3)$ 0.2 ppm, $Cu(CuSO_4 \cdot 5H_2O)$ 0.01 ppm, $Fe(FeCl_3 \cdot 6H_2O)$ 2 ppm 을 各各 添加하였다.

水耕栽培方法은 裡里 316 號의 種子를 Bentonite 에 播種하고 標準培養液을 가끔 加해주면서 硝子溫室에서 30日間 育成한 後 이들 苗를 3.5 l 프라스틱 pot 에 3株 1本씩 移秧하고 標準培養液에서 30日間 栽培한 後

培養液中 砒素濃度가 0, 1, 5, 10, 15 ppm 이 되도록 水溶性鹽類 $Na_2HAsO_4 \cdot 7H_2O$ 를 添加하여 水稻를 60日 동안 栽培하였다. 培養液의 更新은 砒素處理後 2週間은 7日에 1번씩 그 以後는 3日에 1번씩 하였고, 培養液 更新時 液中 pH는 HCl 과 NaOH 를 使用하여 6.0 으로 調節하였으며 本 試驗은 處理當 3反覆으로 遂行되었다.

2. 葉中 水分含量과 關聯된 特性調査

蒸散量 調査는 3.5 l 프라스틱 pot 에 砒素濃度를 달리한 培養液 3.3 l 을 넣고 一定期間 栽培後 殘餘 培養液量을 Digital balance 로 測定하여 消耗된 培養液量을 蒸散量으로 보았다.

氣孔抵抗性, 空氣流量, 葉溫 및 葉內濕度⁽⁸⁾는 Porometer(LI-1600)의 Sensor 를 잎의 一定部位에 固定시키고 葉이 平衡狀態에 도달한 다음 이들 要因들을 차례로 測定하였다.

3. 植物體 砒素分析

根 및 莖葉中 砒素分析은⁽⁹⁾ 試料 各各을 1g 및 5g 取하고 이에 蒸溜水, 黃酸, 窒酸을 一定量 加하고 熱板위에서 加熱分解하여 反應시킨 後 再次 窒酸 및 過鹽素酸을 加하여 濾液이 透明하게 될때까지 分解시켜 50 ml mess flask 에 定容한 後 이 濾液을 AgDDC 法으로 測定하였다.

結果 및 考察

1. 蒸散量의 調査

培養液中 砒素處理濃度에 따른 水稻體의 蒸散量은 表 2와 같이 砒素處理後 1週日까지는 對照區에 비해 砒素處理區에서 더욱 增加하고 있으나 2週제 부터는 砒素를 處理한 區에서 蒸散量은 점차 減少하였으며 이는 砒素處理濃度가 높고 時日이 經過할수록 더욱 뚜렷하였다. 이와같이 砒素處理後 7日까지는 砒素處理區가 對照區에 비해 오히려 增加한 것은 Sharp 等⁽¹⁰⁾이 뿌리가 外部로 부터 弱한 刺戟을 받으면 뿌리의 機能이 促進된다고 報告한 바와같이 健全한 뿌리가 砒素를

Table 1. Average content of various elements in tap water (unit : ppm)

pH	Ca	Mg	K	Na	Fe	Mn	Cu	Zn	Pb	Cd	As
6.7	8.91	2.89	0.94	10.5	0.16	0.03	0.002	1.65	0.003	0.002	0.002

Table 2. Changes in transpiration of rice plants with different As levels in nutrient solution (unit : ml)

As treatment(ppm)	Measurement date	June					
		8	15	21	24	27	30
0		615	994	1,142	858	1,451	1,622
1		775	767	975	715	1,206	1,351
5		680	774	973	678	993	1,025
10		641	600	906	562	800	648
15		625	884	303	217	213	225

吸收하므로써 初期에는 刺戟을 받아 根毛를 더 많이 發生시켜 水分의 吸收가 더 많았던 것으로 판단되며 15 日부터는 砒素가 뿌리에 集積됨으로써 뿌리의 機能을 沮害시켜 水分吸收에 影響을 주었기 때문에 思料된다.

2. 葉의 水分含量과 關聯된 特性調查

水稻葉中 水分含量과 關聯된 諸要因에 對한 變化는 表 3 과 같이 培養液의 砒素濃도가 높아질수록 空氣流量, 蒸散率 및 葉中溫度는 減少한 反面 氣孔抵抗性과 葉溫은 높아졌다. Mark 等⁽¹¹⁾은 복숭아의 幼苗에 水分障害를 줌으로써 氣孔抵抗性은 높아졌다고 하였고 O'toole 等⁽¹²⁾은 水稻의 잎이 안으로 말리는 것은 水分障害에 依한 葉의 蒸散量 減少와 氣孔抵抗의 增加에 起因된다고 하였고 Kirkham⁽¹³⁾은 植物體內 Cd 含量이 높을수록 氣孔抵抗性은 增加하고 蒸散率은 減少하였다고 하였다. 本 試驗에서도 砒素處理濃도가 높아짐에 따라 水稻葉의 蒸散率 低下와 氣孔抵抗性의 增加程度가 뚜렷하여 植物體가 水分障害를 크게 받고 있음을 알 수 있다. 또한 液中 砒素濃도가 높아짐에 따라 葉

內濕도가 減少하는 것은 葉의 水分不足과 직접 關聯이 있는 것으로 생각되며 氣孔으로 流入되는 空氣流量의 減水는 植物이 水分障害로 因해 自體防禦作用으로 氣孔이 좁혀지거나 닫혀지기 때문에 나타나는 現象으로 판단된다. 한편 砒素處理濃도가 높아짐에 따라 葉溫이 上昇되는 것은 藥의 蒸散作用 抑制에 起因되는 것으로 생각된다.

3. 水稻體의 砒素含量과 空氣流量, 氣孔抵抗性 및 蒸散率과의 關係

培養液中 砒素濃도에 따른 水稻體의 莖葉 및 뿌리中 砒素含量은 그림 1 과 같이 液中 砒素濃도가 增加함에 따라 뿌리에서는 砒素處理濃도가 5 ppm 까지는 砒素含量이 急激히 增加하나 10 ppm 과 15 ppm 處理區에서는 緩慢한 增加를 보이고 있으며 莖葉에서는 培養液中 砒素處理濃도가 增加함에 따라 砒素含量이 서서히 增加하고 있으며, 뿌리에 比해 그 含量이 크게 낮았다. 이는 Hara 等⁽²⁾이 植物體內 砒素의 分布는 뿌리에 大部分 集積되고 地上部에는 少量移行되었다는 報告나 土耕으로 實施한 前報⁽⁶⁾의 報告와 一致한다.

Table 3. The effect of As concentration in nutrient solution on the leaf water status of rice plants at the 50 days after arsenic treatment

As treatment (ppm)	Diffus. res. (sec/cm)	Transpiration ($\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{sec}$)	Leaf temp. ($^{\circ}\text{C}$)	CUV temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Humidity (%)	Flow (cm^3/sec)
0	0.72	14.54	33.3	34.7	61.8	0.627
1	1.16	9.23	34.5	35.6	58.2	0.383
5	4.82	4.74	37.5	37.3	50.5	0.219
10	5.79	3.95	38.0	37.6	50.0	0.182
15	20.6	1.21	38.7	38.2	48.0	0.057

한편 뿌리중 砒素含量은 培養液中 砒素濃도가 5 ppm까지는 크게 增加하나 그 以上の 濃度에서는 緩慢한 增加現象을 나타낸 것은 表 2에서 보는바와 같이 液中 砒素濃도가 5 ppm까지는 時日이 經過하더라도 蒸散量이 增加한 反面 10 ppm과 15 ppm 處理區에서는 砒素處理 後 3週日(6月 21日)을 起點으로 蒸散量이 減少하는 것으로 보아 培養液中 砒素는 濃도가 5 ppm까지는 植物이 砒素를 吸收할 수 있는 能力이 있는 反面 그 以上の 濃度에서는 吸收力이 喪失되기 때문으로 判斷된다. 莖葉에서는 뿌리와는 달리 培養液中 砒素濃도가 增加함에 따라 莖葉中 砒素濃도가 서서히 增加하는 것은 作物에 대한 砒素의 吸收特性에 依한 것으로 생각된다.

表 4는 莖葉 및 뿌리中 砒素含量과 Porometer에서 測定한 氣孔抵抗性, 蒸散率 및 氣孔으로 流入되는 空氣流量과의 關係를 回歸式으로 나타내었다. 이들 要因들은 植物體中 砒素含量과 모두 有意性 있는 相關을 나타내었으며 이들 要因中 蒸散率과 空氣流量은 뿌리中 砒素含量과 더 높은 相關을 나타낸 反面 氣孔抵抗性은 莖葉中 砒素含量과 더 높은 相關을 나타내었다. 葉中 水分狀態에 따라 影響을 받는 이들 要因들은 一次的으로 뿌리의 砒素吸收程度에 따라 크게 影響을 받

을 것으로 생각되며 氣孔抵抗性도 氣孔開閉에 關與하는 Cytokinin이 뿌리에서 合成되므로 莖葉中 砒素含量보다 뿌리중 砒素含量과 더 密接한 關係가 있을 것으로 생각되나 氣孔抵抗은 葉中 含量과 높은 相關이 있다는 Fisher와 Krammer의 報告等^(15,16)으로 미루어 보아 葉中 K含量이 氣孔抵抗性에 2次的으로 影響을 주어 根보다 莖葉中 砒素含量과 더욱 密接한 關係를 나타낸 것으로 사료되며 本 試驗에서도 莖葉中 K含量과 氣孔抵抗性과는 有意性있는 負의 相關($r = -0.966$)을 나타내었다(그림 2).

4. 生育狀況

培養液中 砒素處理濃도에 따른 時期別 水稻의 生育程度를 表 5에서 나타내었다. 砒素處理後 15日의 生育狀況을 보면 砒素處理濃도가 增加함에 따라 生育이 비교적 뚜렷이 減少하고 있으나 葉幅에서는 砒素 15 ppm을 除外한 區에서는 별다른 差異가 없었다. 그러나 砒素處理後 30日에는 草長, 分蘗數, 葉幅에서도 砒素處理間에 뚜렷한 生育의 差異를 나타내었으며 砒素處理後 60日에 收穫한 地上部 및 뿌리의 乾物重에 있어서도 그 差異가 뚜렷하였다. Eaton等⁽¹⁷⁾은 植物이 水分부족현상을 일으키면 體內 澱分含量은 減少하고

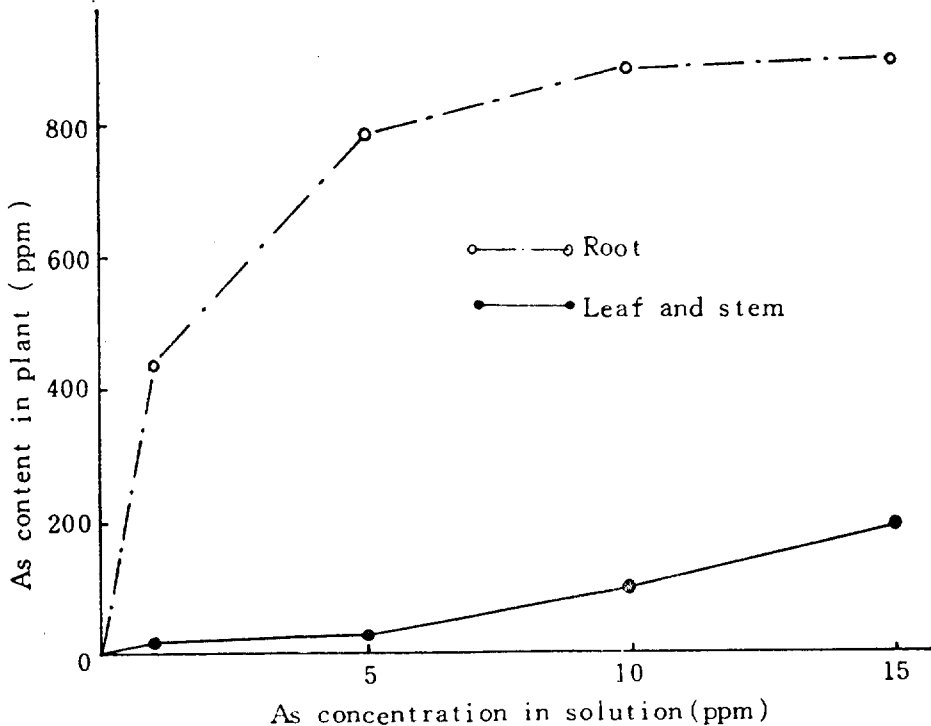


Fig. 1. Changes in As contents of rice plant with different As levels in nutrient solution at 45 days after transplanting.

Table 4. Regression equations and correlation coefficients between leaf water status (Y) and As content (X) in shoot and root

Part of plant	Regression equation	Correlation coefficient
Shoot	$Y_1(\text{Flow})=0.000020 X^2-0.00602 X+0.50333$	-0.783**
	$Y_2(\text{D.R.})=0.000418 X^2+0.0115 X+1.72402$	0.970**
	$Y_3(\text{Transp.})=0.00049 X-0.14680 X+11.76491$	-0.784**
Root	$Y_1(\text{Flow})=0.0000003 X^2-0.000556 X+0.62683$	-0.905**
	$Y_2(\text{D.R.})=0.0000234 X^2-0.011518 X+0.96278$	0.682**
	$Y_3(\text{Transp.})=-0.0000019 X^2-0.010776 X+14.4706$	-0.903**

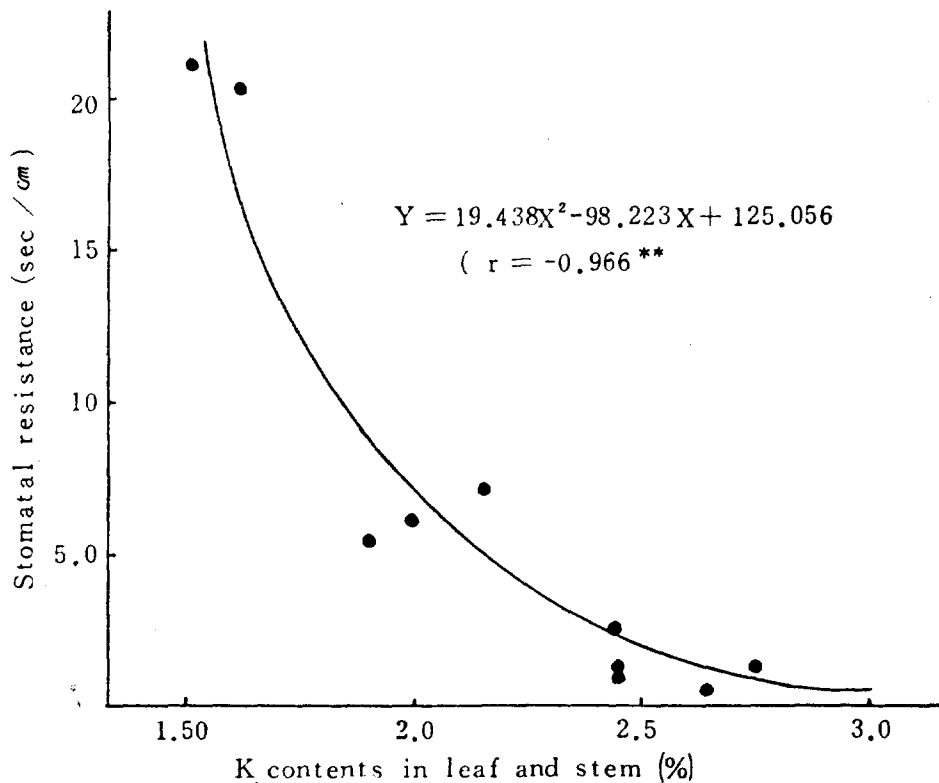


Fig. 2. Relationships between diffused resistance and K contents in shoots in 45 days after transplanting

糖含量은 增加됨으로써 炭水化物 分配에 缺陷을 나타낸다고 報告하였으며 Krammer⁽¹⁰⁾는 植物이 水分障害를 받으면 體內의 단백질이 加水分解되고 아미노산이 蓄積되어 窒素付謝에 混亂을 야기시킨다고 하였다. 本試驗에서 水耕液中 砒素濃度가 增加할수록 生育 및 植物體의 乾物重이 크게 減少되는 것은 植物이 水分 및 養分의 吸收 供給이 원활치 못하므로 體內에서 炭水化物의 分配缺陷과 蛋白質의 加水分解 및 아미노산의 蓄積等 窒素付謝의 混亂等에 그 原因이 있을 것으로 생각된다. 그러나 根重에 있어서 砒素 1 ppm 區가 對照

區보다 더 컸다. 이는 水分刺戟을 弱하게 받은 植物은 水分이 充分한 狀態에서 生育한 植物에 比하여 滲透調節能力이 더 良好하기 때문이라는 Sharp 等⁽¹⁰⁾의 報告와 같이 생각된다.

5. 被害症狀

砒素處理로 葉의 被害症狀은 3日頃에 砒素 15 ppm 區에서 잎이 말리며 葉先端과 가장자리가 壞死되기 시작하였고 處理後 15日頃 부터는 低濃度區에서도 같은 症狀이 나타나기 시작하여 時日이 경과할수록 뚜렷이

Table 5. Growth status of rice plant with different As levels in nutrient solution

As treatment (ppm)	Days after As treatment							
	15(June 15)			30(July 1)			60(Harvest)	
	Height (cm)	No. of tiller	Leaf width (cm)	Height (cm)	No. of tiller	Leaf width (cm)	Straw	Root (g/plant)
0	54.4	11.0	1.02	62.6	20.8	1.31	47.5	10.7
1	47.0	10.7	1.01	60.3	17.3	1.26	39.3	11.7
5	44.0	8.7	1.05	55.7	13.7	1.13	19.2	7.0
10	41.2	8.0	1.0	44.3	7.0	1.04	5.4	2.5
15	37.3	6.7	0.95	38.3	6.0	0.90	2.0	0.9
L S D(5%)	9.2	1.7	0.07	9.9	4.7	0.09	5.2	0.8
(1%)	13.4	2.5	0.10	14.4	6.9	0.14	7.5	1.2

나타났다. 특히 葉捲症狀은 잎이 蒸散活動을 많이 하는 11時頃부터 15時頃 사이에 뚜렷이 나타났으며 저녁과 아침에는 다시 회복되었다.

뿌리는 砒素處理後 2日頃부터 砒素 15 ppm 區에서 褐變되기 시작하였고 低濃度區에서도 時日이 經過됨에 따라 褐變程度는 뚜렷하였다. 砒素處理後 60日에 뿌리의 發育狀態를 보면 對照區에서는 뿌리가 乳白色이고 砒素 1 ppm 區에서는 약간 褐變되었으나 根毛數는 對照에 비해 오히려 더 많았고 砒素 5 ppm 과 10 ppm 區에서는 新根이 짧고 角質化되었으며 2次根의 發育이 不良하고 2次根에서 3次根이 不規則하게 發生한 것도 있었다. 또한 砒素 15 ppm 區에서는 뿌리가 胼相態로 形態를 찾아볼 수 없었다.

植物에 對한 砒素被害症狀은 뿌리가 褐變되고 잎이 시들거나 말리며 葉先端과 가장자리가 壞死되는 것이 普遍的^(4,5)이며 本 試驗에서도 이와 類似하였으며 이와 같은 症狀은 뿌리의 砒素 過多蓄積에 의한 뿌리 付謝機能의 阻害 現象으로 판단된다.

또한 砒素 5 ppm 區와 10 ppm 區에 나타난 葉의 黃化症狀은 鐵의 缺乏症狀으로 생각되며 이는 培養液中의 砒素가 鐵과 結合하여 難溶性化合物⁽¹⁸⁾을 形成하므로써 나타난 現象으로 推定된다.

要 約

砒素處理에 依한 水稻의 水分吸收樣相을 究明하기 위하여 培養液에 砒素를 0, 1, 5, 10, 15 ppm 處理하고 水稻를 水耕栽培하여 砒素處理別 水稻의 蒸散量과 葉의 氣孔抵抗性, 空氣流量, 葉의 溫, 濕度 및 植物體의 砒素含量 등을 調査하여 얻어진 結果는 다음과 같다.

1. 蒸散量은 培養液中 砒素濃도가 높아질수록 현저

히 減少되었다.

2. 培養液中 砒素濃도가 높아질수록 葉의 氣孔抵抗性 및 葉溫은 높아지나 空氣流量, 蒸散率 및 葉內濕度는 낮아졌다.

3. 葉의 空氣流量, 蒸散率 및 氣孔抵抗性은 뿌리 및 莖葉中 砒素含量과 높은 相關을 나타내었으며 이들중 空氣流量 및 蒸散率은 뿌리중 砒素含量과 氣孔抵抗性은 莖葉中 砒素含量과 더 높은 相關을 나타내었다.

4. 水稻의 草長, 分蘖數, 葉幅, 莖重 및 根重은 培養液中 砒素濃도가 높아질수록 현저히 減少되었다.

5. 水稻에 對한 砒素被害症狀은 뿌리가 褐變하고 잎이 말리며 葉의先端과 가장자리가 壞死되었다.

參 考 文 獻

1. Machlis, L. (1941) : Accumulation of arsenic in the shoots of Sudan grass and Bush bean. *Plant physiology*, 16, 521.
2. Hara Tetsuo, Yoji Sonoda, and Iwao Iwai. (1977) : Growth response of cabbage plants to arsenic and antimony under water culture conditions. *Soil Sci. Plant Nutri.*, 23(2), 253.
3. Morris, H.E., and Swingle, D.B. (1927) : Injury to growing crops caused by the application of arsenical compounds to soil. *Jour. Agr. Res.*, 34, 59.
4. 環境保全(1984) 環境廳, p. 354.
5. La Touche, Y.D., and Michael C. Mix. (1982) : Seasonal variations of arsenic and other trace elements in Bay Mussels (*Mytilus edulis*). *Bull. Environm. Contam. Toxicology*, 29, 665.

6. 李敏孝, 林秀吉, 金福榮(1986) : 土壤中 砒素의 行動과 水稻의 砒素吸收에 依한 被害生理, 生態에 關한 研究, II. 土壤에 砒素處理로 因한 水稻의 砒素吸收 및 生育에 미치는 影響, 韓國環境農學會誌, 5(2), 95.
7. Yoshida, S., Forno, D.A., Cock, J.H. and Gomez, K.A. (1972) : Laboratory manual for physiological studies of rice. IRRI, 53
8. Anonymous (1981) : LI-1600 Steady state porometer instruction manual. Pub. 8107-OIRI. LICOR, Lincoln, NE.
9. 栽培植物分析 測定法(1976) : 作物分析法 委員會編 p.188.
10. Sharp, R.E., and Davies, W.J. (1979) : Solute regulation and growth by roots and shoots of water stressed maize plants. *Planta*, 147, 43.
11. Mark Hand, J., Eric Young, and Aurea C. Vasconcelos. (1976) : Leaf water potential, stomatal resistance, and photosynthetic response to water stress in peach seedlings. *Plant Physiology*, 57, 315.
12. O'toole, J.C. and Ronald T. Cruz. (1980) : Response of leaf water potential, stomatal resistance, and leaf rolling to water stress. *Plant Physiology*, 65, 428.
13. Kirkham, M.B. (1978) : Water relations of cadmium-treated plants. *J. Environ. Qual.*, 7(2), 334.
14. Meidner, H. (1967) : The effect of kinetin on stomatal opening and the rate of intake of carbon dioxide in mature primary leaves of barley. *J. Exp. Bot.*, 18, 556.
15. Fisher, R.A. (1971) : Role of potassium in stomatal opening in the leaf of vicia faba. *Plant Physiology*, 47, 555.
16. Krammer, P.J. (1983) : Water relations of plants. Academic Press.
17. Eaton, F.M., and Ergle, D.R. (1948) : Carbohydrate accumulation in the cotton plant at low moisture levels. *Plant Physiol.*, 23, 169.
18. Ganje, T.J. and Rains, D.W. (1982) : Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. Second edition, p.385.