

밀의 Aluminum 耐性에 관한 研究

정 회 주 · 이 인 숙

이화여자대학교 생물학과

A Study of Aluminum Tolerance of Wheats

Chung, Hee-Joo and In-Sook Lee

Department of Biology, Ewha Womans University

ABSTRACT

Studies were conducted to evaluate the differential Al tolerance of Suwon 205 and Olmil wheats grown in nutrient solution and to determine the impact of NH_4^+ -N or Ca^{2+} nutrition on the response of the two wheat varieties to Al.

In various concentrations of Al, Olmil induced lower pH levels than Suwon 205 in nutrient solutions and the reduction of root length and dry weight was greater in Olmil than in Suwon 205. The uptake of Al was greater in root than in shoot of the two wheat varieties, but more increased in root of Olmil. Also the uptake of Ca, Mg, K and P was inhibited by Al, especially decrease of Ca and P uptake in roots of Olmil was more pronounced than in those of Suwon 205.

In nutrient solutions that contained NH_4^+ -N plus 9ppm Al, the ability of both varieties to raise the pH was reduced as the level of NH_4^+ -N in nutrient solutions was increased, and Al-sensitive Olmil induced lower pH than did Al-tolerant Suwon 205. Al toxicity was intensified by increasing the concentration of NH_4^+ -N in nutrient solution and toxic effect was greater in Olmil.

Al toxicity in the two wheat varieties was steadily increased as the Ca level of nutrient solution was reduced, especially this effect was stronger in Al-sensitive Olmil than in Al-tolerant Suwon 205.

서 론

우리나라 밭 토양의 대부분은 약산성 토양으로 평균 pH 5.7내외이며, pH 5.5이하가 되는 토양도 상당히 많다(Kim, *et al.*, 1982). 그러나 맥류 재배의 최적 pH는 대맥이 6.5~6.7, 소맥이 6.0~7.5로 이에 미치지 못하고 있다(Hwang, *et al.*, 1984).

산성 토양에서 식물이 피해를 입는 원인에 여러가지가 있으나, 가장 큰 요인은 Al 독성으로 보고되어 있다(Foy, *et al.*, 1967; Long, *et al.*, 1973; Lafever, *et al.*, 1977).

Al 독성 증상은 측근수의 증가, 뿌리의 길이와 생체량의 감소, 뿌리 끝의 Darkening의 발생등이 나타나는데(Reid, *et al.*, 1971; Polle, *et al.*, 1978), 이는 Al이 근세포의 분열을 억제시키기

때문이다(高林, *et al.*, 1981).

또한 Al이 존재하면 식물이 영양염류의 흡수, 특히 Ca과 P의 흡수가 감소된다(Clarkson, 1966a, 1966b, 1967b). Al은 밀(Johnson & Jackson, 1965)과 옥수수의 Ca^{2+} 흡수를 감소시키나 shoot로의 이동은 방해하지 않는다(Paterson, 1965). Fleming(1969)은 강낭콩에서 Al의 독성은 그에 대한 내성이 큰 Perry와 민감한 Chief의 지상부와 뿌리에서 Ca^{2+} 의 흡수가 감소하나, 이러한 효과는 Chief에서 더욱 현저하며, Al에 의한 Ca^{2+} 결핍은 두 품종에서 서로 다른 정도의 엽병상해 증상을 나타낸다고 보고했다.

Foy and Brown(1964)은 산성 토양이나 배양액에서 자라는 식물에서 Al 독성은 P의 결핍증상과 같이 나타난다고 하였으며 고농도의 Al은 배지에서 P의 치환성과 흡수를 감소시키며, 높은 Al농도와 낮은 P의 유해한 효과는 산성 토양에서 분리하기가 매우 어렵다고 하였다.

Al 내성의 정도는 생육지의 조건(Foy, *et al.*, 1965, 1974), 영양염류의 공급 및 식물의 종류에 따라 다르며(Foy, *et al.*, 1973; Martini, *et al.*, 1977), 농도가 높은 산성 토양에서 반응하는 양상도 다르게 나타난다(東, *et al.*, 1954).

pH변화에 따른 품종간 차이는 Al 내성의 요인이 되며, 소맥이나 대맥 품종은 완전한 배양액의 pH수준에서도 효과의 차이가 있다(Dodge, *et al.*, 1972). Foy, *et al.*(1965, 1967)은 밀과 보리에서 Al 내성종인 Atlas 66과 Dayton보다 Al에 예민한 Monon과 Kearney가 더 낮은 pH에서 독성을 낸다고 보고한 바 있다. 근계에서 낮아진 pH는 Al의 용해성과 독성을 증가시켜 식물종간의 Al 내성의 차이를 유도한다(Clarkson, 1970).

최근의 연구에 의하면 Al에 민감한 품종의 낮은 pH는 배양액의 NH_4^+-N 의 농도와 관계가 있다고 한다.

Fleming(1983)은 Al과 함께 NH_4^+-N 은 $NO_3^- -N$ 의 흡수를 방해하고, pH증가율을 감소시키는데 이는 Al의 내성이 강한 품종보다 약한 품종에서 더욱 현저하다고 했다. Al 피해는 배양액중의 $NH_4^+ -N$ 농도가 증가됨에 따라 더욱 심해진다.

Al 독성에 관한 생화학적 기작은 아직까지 명확하게 밝혀져 있지 않으나 Al 내성의 차이를 가져오는 요인들로는 (1)품종별 형태적 손상정도에 대한 뿌리의 저항성의 차이와 Al-stress하에서 계속적인 뿌리 신장능, stress해소시 새로운 뿌리의 발생능의 차이, (2)근계에서 pH변화능과 Al 용해능의 차이, (3)뿌리와 지상부의 Al 흡수와 수송능의 차이, (4)Ca, Mg, K, Si 및 P의 흡수와 이용능의 차이 등을 들 수 있다(Muguira, *et al.*, 1976).

본 연구에서는 배양액의 pH변화, 뿌리와 지상부의 길이, 생체량 및 영양염류의 흡수량을 Al 내성의 평가 기준으로 하여 밀의 두 품종인 수원 205와 올밀에 대한 Al내성 정도를 조사하고, 이에 대한 NH_4^+-N 과 Ca^{2+} 의 영향을 밝혔다.

재료 및 방법

재 료

본 실험에서 사용된 밀 품종은 Al에 대해 서로 다른 내성을 가지고 있는 수원 205와 올밀 종자로 수원 맥류 연구소로부터 받아 온 것을 사용했다.

방 법

1. 발아실험

울밀의 종자를 10% sodium hypochloride로 소독한 후 여과지를 간 사례에 각 100粒씩 넣고 $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 로 0.0, 0.3, 0.6, 1.0, 3.0 및 6.0ppm의 Al^{3+} 용액을 만들어 총 20ml씩을 처리하여 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 에서 3일간 암발아시켜 발아율을 조사했다.

2. 배양액의 pH변화와 식물의 성장 측정

밀의 종자를 증류수로 3일간 암발아시켜 1/5 strength Steinberg solution(Foy, *et al.*, 1967)을 $70 \pm 1\text{ml}$ 씩 넣은 시험관에 한 개체씩 옮겨 배양실에서 20일간 성장시켜 배양액의 pH변화와 식물체의 신장 성장 및 생체량의 증가를 조사했다.

배양액은 Al의 농도가 0인 대조구와 3, 6, 9, 12ppm 농도의 Al처리구를 두었으며, 배양실은 조도 3,000Lux, 낮의 길이 16시간, 밤의 길이 8시간으로 조절하였으며, 낮의 온도를 $22 \pm 1^\circ\text{C}$, 밤의 온도를 $18 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지시켰다.

가. pH

대조구와 Al 처리구의 초기 pH를 HCl과 NaOH용액을 사용하여 $\text{pH}4.5 \pm 0.1$ 로 정확히 맞추후 48시간 간격으로 pH meter(Toyo PH /mv meter model PT-60F)를 사용하여 측정했다.

나. 뿌리와 지상부의 신장율

20일간 식물을 성장시킨 후 수확하여 가장 긴 뿌리와 지상부 길이를 측정하여 상대 신장율을 다음과 같이 계산했다.

$$\text{상대 신장율} = \frac{\text{Al처리구의 뿌리나 지상부의 길이(cm)}}{\text{대조구의 뿌리나 지상부의 길이(cm)}} \times 100$$

다. 생체량

20일간 성장시켜 수확한 식물체를 증류수로 씻은 후 뿌리와 지상부로 분류하여 $75 \pm 1^\circ\text{C}$ oven에서 일정한 무게가 될 때까지 건조시켜 Al농도에 따른 건량을 10개체를 한 단위로 하여 측정했다.

3. Al 및 영양염류의 흡수량

건조시킨 식물체에 nitric acid와 perchloric acid(4:1 v/v)용액을 넣어 digestion시킨 후 50ml로 희석하여 사용하였다. Al, Ca, Mg 및 K는 atomic absorption spectrometer(A.A ; Perkin-Elmer 2380)로 측정하였으며 P는 A.O.A.C. 방법으로 spectrometer를 사용하여 측정했다.

4. NH_4^+-N 의 농도에 따른 배양실험

수원 205와 울밀을 3일간 암발아시켜 대조구(0 ppm Al^{3+})와 Al처리구(9ppm Al^{3+})를 두고 1/5 Steinberg solution을 배양액으로 하여 20일간 성장시켰다.

배양액의 성분중 NH_4^+ 와 NO_3^- 를 포함한 염을 제거시키고 부족되는 원소를 보충하였으며, KNO_3 와 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 를 사용하여 N(62ppm)을 공급하였다. 이 때 사용된 NH_4^+-N 과 NO_3^--N 의 비는 0/100, 10/90, 30/70 및 50/50으로 하였다.

모든 배양액의 초기 pH는 HCl과 NaOH를 사용하여 4.5 ± 0.1 로 맞추었으며 48시간 간격으로

pH meter를 사용하여 측정했다. 수확한 식물체를 뿌리와 지상부로 구분하여 $7.5 \pm 1^\circ\text{C}$ oven에서 건조시켜 건량을 각각 측정하고, 전기한 바와 같은 방법으로 Ca, Mg, K 및 P의 함량을 측정했다.

5. Ca^{2+} 의 농도에 따른 배양실험

두 품종을 발아시켜 대조구와 Al 9ppm 처리구에서 20일간 성장시켰다.

배양액으로 1/5 Steinberg solution을 사용했으며, 용액성분중 Ca^{2+} 을 포함한 염을 제거시키고 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 를 사용하여 0.0, 2.0, 8.0, 16.0, 32.0, 50.0ppm Ca^{2+} 농도의 처리구로 조절하였다.

부족되는 원소는 보충하였으며, 배양액의 초기 pH는 4.5 ± 0.1 로 일정하게 맞추었다.

20일 후 수확한 식물체는 전기한 바와 같은 방법으로 건량과 Ca, Mg, K 및 P의 함량을 측정했다.

결과 및 고찰

Al농도에 따른 발아율

Al은 두 품종의 발아율에 영향을 미치지 않았다(Fig. 1).

수원 205와 올밀의 발아율은 Al 농도에 따라 차이를 나타내지 않았으나, 수원 205의 경우 발아율은 농도가 높아질수록 다소 낮아졌고 올밀에서는 약간 촉진되었는데 이는 품종간의 차이인 것으로 사료된다.

Cate와 Sukhai(1964)는 1ppm의 Al은 벼의 발아에 영향을 미치지 않는다고 했으며, Dessureaux(1969)도 Al 100ppm까지는 alfalfa의 발아를 저해하지 않으나, 측근 발생후 Al 독성이 약하게나마 나타난다고 보고했다.

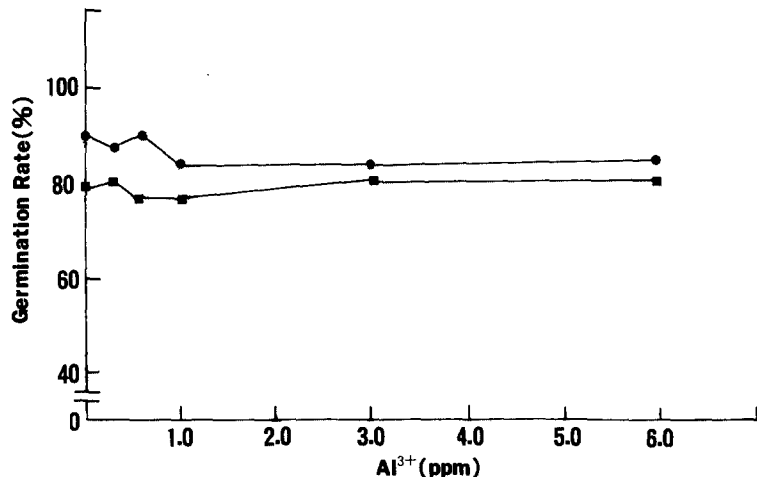


Fig. 1. The effect of aluminum on the germination rate of Suwon 205 and Olmil.

● : Suwon 205 ■ : Olmil

품종간의 Al 내성

1. pH의 영향

Al 농도를 달리하여 재배한 수원 205와 올밀의 배양액의 pH는 배양후 7일경부터 뚜렷한 변화를 보였다(Table 1).

생장기간 동안 두 품종의 pH는 일반적으로 증가했으나, Al의 농도가 높아질수록 증가율은 점차 감소하였다.

대조구에서 두 품종의 pH는 거의 같은 비율로 증가되었으나, Al 처리시에는 올밀의 pH가 수원 205보다 더욱 낮아졌다. 이는 올밀의 뿌리에서 양이온 치환능(cation exchange capacity)이 수원 205보다 커서 용액중에 다량 존재하는 Al^{3+} 을 흡수하고 H^+ 을 용액중으로 방출했기 때문으로 사료된다.

Table 1. The effect of aluminum on pH changes of nutrient solution during growing period of Suwon 205 and Olmil

Al added (ppm)	Variety	pH									
		0~2 Days	2~4 Days	4~6 Days	6~8 Days	8~10 Days	10~12 Days	12~14 Days	14~16 Days	16~18 Days	18~20 Days
0.0	Suwon 205	-0.3	+0.1	+0.4	+0.5	+0.7	+1.1	+1.4	+1.6	+1.8	+1.8
	Olmil	-0.2	+0.1	+0.2	+0.3	+0.7	+1.2	+1.5	+1.6	+1.7	+1.7
3.0	Suwon 205	-0.1	+0.4	+0.5	+0.6	+1.0	+1.2	+1.5	+1.5	+1.6	+1.6
	Olmil	+0.0	-0.1	-0.2	+0.1	+0.4	+0.5	+0.8	+1.2	+1.1	+1.4
6.0	Suwon 205	-0.2	-0.2	+0.2	+0.2	+0.7	+0.9	+1.1	+1.2	+1.5	+1.5
	Olmil	-0.3	0.0	-0.2	-0.3	+0.1	+0.2	+0.3	+0.5	+0.7	+0.9
9.0	Suwon 205	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1	+0.2	+0.4	+0.7	+1.0	+1.2	+1.3
	Olmil	-0.3	-0.4	-0.1	-0.3	-0.2	-0.1	+0.3	+0.2	+0.6	+0.5
12.0	Suwon 205	-0.3	-0.3	-0.2	-0.1	0.0	+0.2	+0.5	+0.6	+0.6	+1.6
	Olmil	-0.3	-0.4	-0.2	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	+0.1	0.0	0.0

밀 품종사이에서 서로 다른 Al 내성은 근계에서 pH를 변화시키는 능력과 관계가 있으며, Al에 대해 내성이 강한 품종에서 민감한 품종보다 더 높은 pH를 나타낸다(Foy, 1965). 이렇게 볼 때 수원 205는 올밀보다 Al내성이 큰 품종이며, 올밀에서 유도된 낮은 pH는 Al용해성과 잠재적 독성을 증가시켜 더욱 심한 피해를 초래할 것으로 사료된다.

2. 뿌리와 지상부의 신장

두 품종에서 뿌리의 신장은 Al 농도와 품종에 따라 유의적인 차이를 나타냈으며($F=2.24$, $p<0.05$), 지상부의 신장은 Al 농도에 따라 유의적인 차이를 보였으나($F=3.69$, $p<0.05$), 품종간에는 차이가 없었다(Fig. 2, Fig. 3).

Al의 농도가 높아짐에 따라 뿌리와 지상부의 평균 신장은 점차 감소되었으며, 올밀의 감소율은 수원 205보다 더 크게 나타났다. 특히 Al은 올밀의 지상부 신장보다 뿌리 신장을 심하게 억제시켰는데 이는 뿌리신장이 가장 신빙성 있는 Al 내성의 지표라는 Campbell(1977)의 보고와도 일치하는 것이다.

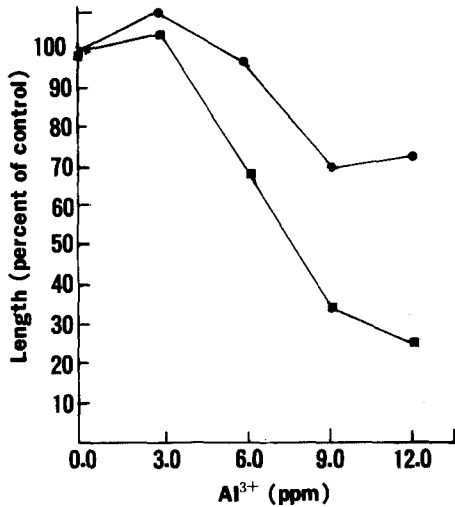


Fig. 2. Root growth of Suwon 205 and Olmil in different Aluminum concentrations. Growth was presented as percent of control (0ppm Al³⁺) in 20 days after planting. • : Suwon 205 ■ : Olmil

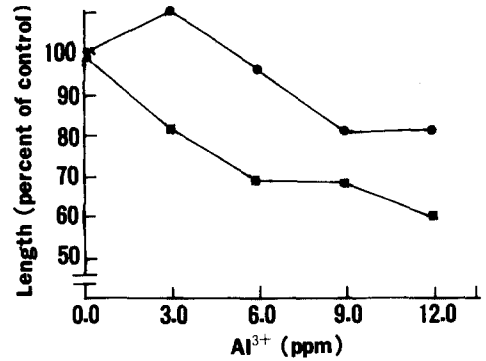


Fig. 3. Shoot growth of Suwon 205 and Olmil in different Aluminum concentrations. Growth was presented as percent of control (0ppm Al³⁺) in 20 days after planting. • : Suwon 205 ■ : Olmil

각 Al처리 농도에서 뿌리신장의 감소율은 수원 205가 3.0%~27.8%에 불과했으나, 올밀은 30.7%~74.7%를 나타냈다. 이러한 생장의 차이는 배지의 free-Al의 높은 농도를 견디는 능력이 품종마다 차이가 있기 때문이다(Neenan, 1960; Lafever, *et al.*, 1976).

Takaki *et al.* (1981)과 Oadsba *et al.* (1978)은 밀의 Aluminum 내성을 Hematoxylin 염색법으로 조사하여 각 Al 농도에서 뿌리의 염색범위와 그 정도에 의하여 내성정도를 평가하고 분열조직 부위에 염색되지 않은 부분이 조금이라도 남아있는 뿌리는 생장이 느리나 계속 신장했고 선단까지 염색된 뿌리는 거의 신장하는 일이 없다고 보고했다. 따라서 올밀의 뿌리에서 생장억제 현상은 Al이 뿌리의 세포분열을 억제시켰기 때문이다.

Fig. 4와 Fig. 5는 Al 용액에서 성장한 두 품종의 뿌리와 지상부의 평균 신장을 회귀직선으로 나타낸 것으로 회귀방정식은 수원 205의 뿌리와 지상부에서 각각 $Y=0.15X+5.56$ ($r^2=0.30$, $p<0.01$), $Y=-0.55X+8.8$ ($r^2=0.71$, $p<0.01$)이며, 올밀의 경우는 $Y=-0.52X+24.6$ ($r^2=0.92$, $p<0.01$), $Y=-0.81X+24.8$ ($r^2=0.90$, $p<0.01$)이다.

Al농도와 뿌리신장과의 상관은 올밀에서는 부상관이나, 수원 205에서는 정상관을 나타낸다. 수원 205에서는 Al의 농도가 높아짐에 따라 뿌리 생장이 다소 촉진되었다. 지상부의 경우 상관은 두 품종 모두에서 부상관을 나타냈으나, 올밀의 지상부 신장이 보다 더 크게 감소했다.

3. 생체량의 비교

농도에 따라 뿌리와 지상부의 생체량은 차이를 나타냈으며(뿌리 ; $F=28.2$, $p<0.01$, 지상부 ; $F=48.0$, $p<0.01$), 두 품종간에도 차이가 있었다(뿌리 ; $F=13.5$, $p<0.01$, 지상부 ; $F=56.0$,

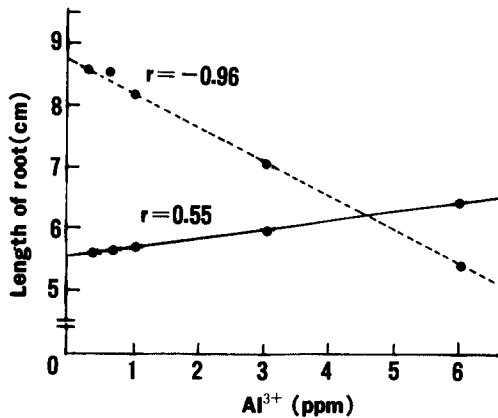


Fig. 4. The linear regression of root length and Aluminum concentrations in Suwon 205 and Olmil. - : Suwon 205 ... : Olmil

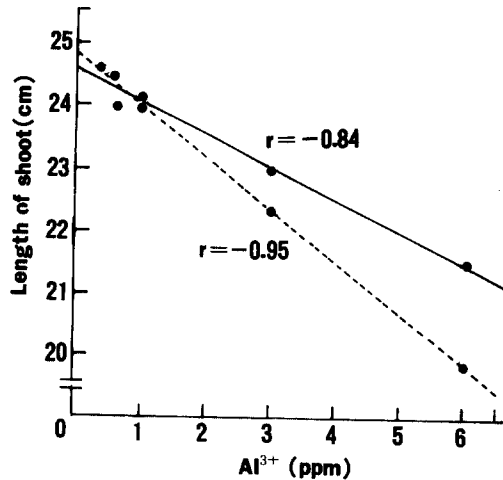


Fig. 5. The linear regression of shoot length and Aluminum concentrations in Suwon 205 and Olmil. - : Suwon 205 ... : Olmil

$p < 0.01$). 또한 Al농도와 품종의 상호작용에 의한 뿌리와 지상부의 생체량도 차이를 나타냈다 (뿌리 ; $F=7.5$, $p < 0.01$, 지상부 ; $F=21.6$, $p < 0.01$).

Al의 고농도로 감에 따라 두 품종의 생체량은 일반적으로 감소했으나, 올밀은 수원 205보다 Al의 영향을 심하게 받아 더 큰 감소를 나타냈으며, 특히 뿌리 생체량의 감소는 현저했다(Fig. 6, Fig. 7).

수원 205에서 상대근중비($Al^{3+}ppm / OAl^{3+} \times 100$)는 Al농도에 따라 124.4%, 124.4%, 97.6%, 78.0%로 Al 3ppm과 6ppm에서는 다소 증가되었으나, 올밀은 76.1%, 57.2%, 56.3%, 41.6%로 계속 감소했다.

Al-내성 품종의 생체량은 일반적으로 대조구에서 보다 Al처리구에서 다소 증가되었는데 이는 Al에 의해 뿌리수가 증가되고 root-thickening이 발생되었기 때문이다(Reid, *et al.*, 1971).

이와 같은 뿌리생체량에 관한 자료는 수원 205의 뿌리에 대한 Al 내성이 올밀의 경우보다 더 크다는 것을 나타낸다.

4. Al³⁺과 영양염류의 흡수

수원 205에서 지상부 Al흡수량은 배양액중의 Al농도에 따라 유의적으로 증가되지 않았으나, 올밀의 뿌리와 지상부, 수원 205의 뿌리의 흡수량은 유의적으로 증가되었으며($p < 0.01$), 뿌리의 흡수량은 지상부보다 훨씬 많았다(Table 2).

올밀은 뿌리와 지상부에서 수원 205보다 더 많은 축적량을 나타냈다(Fig. 8).

Al의 상대흡수율은 Al농도에 따라 수원 205의 뿌리에서 1.0~6.2배를 나타냈으며 지상부에서는 1.4~3.8배를 나타냈으나, 올밀의 뿌리는 1.4~17.0배를 지상부는 21.0~6.0배의 높은 흡수율을 나타냈다.

이는 올밀이 Al에 민감하여 뿌리에서 흡수한 Al을 신속히 지상부로 이동시키지 못해 뿌리에

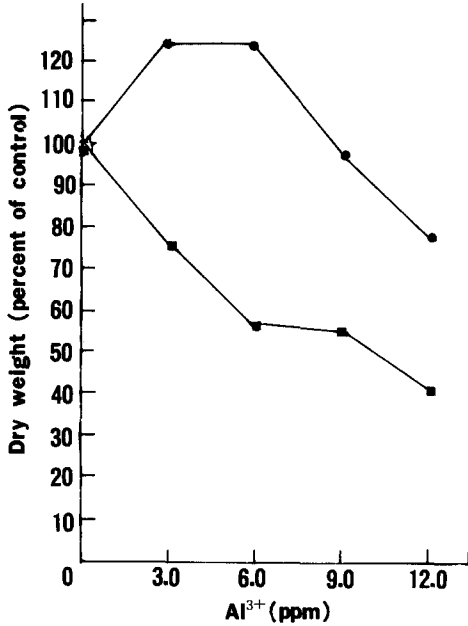


Fig. 6. The effect of Aluminum on dry weight of root in Suwon 205 and Olmil. • ; Suwon 205 ■ ; Olmil

더 많이 축적했으며, 수원 205는 Al에 내성이 커서 배양액으로부터 보다 더 선택적으로 Al을 흡수했기 때문으로 사료된다.

Ca²⁺의 흡수량은 Al의 농도가 높아질수록 두 품종 모두에서 감소했으나, 올밀에서 더 큰 감소를 나타냈다(Table 2). 또한 뿌리와 지상부의 Ca²⁺ 축적률은 뿌리에서 더 크게 감소되었는데 이는 Al이 뿌리에서 Ca²⁺ 흡수를 심하게 방해하나 지상부로의 이동은 방해하지 않는다는 Paterson(1965)의 보고와도 일치하는 것이다.

P의 흡수량도 Al에 의해 감소되었다(Table 2).

12.0ppm의 Al용액에서 P의 흡수율은 수원 205의 경우 뿌리와 지상부에서 각각 60.5%와 52.5%를 나타냈으며, 올밀은 50.0%와 53.6%를 나타냈다. 수원 205의 뿌리의 P흡수율은 올밀에서 보다 다소 높았으나 두 품종 모두에서 뿌리의 흡수량은 지상부보다 컸다. 이는 뿌리의 Al에 의해

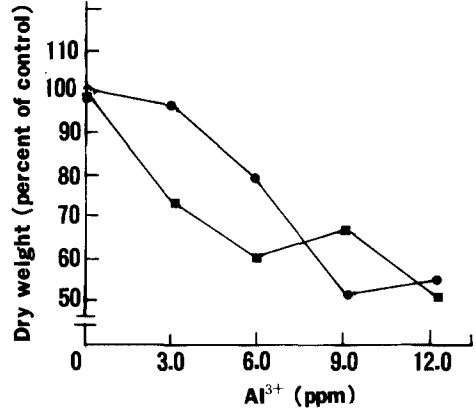


Fig. 7. The effect of Aluminum on dry weight of shoot in Suwon 205 and Olmil. • ; Suwon 205 ■ ; Olmil

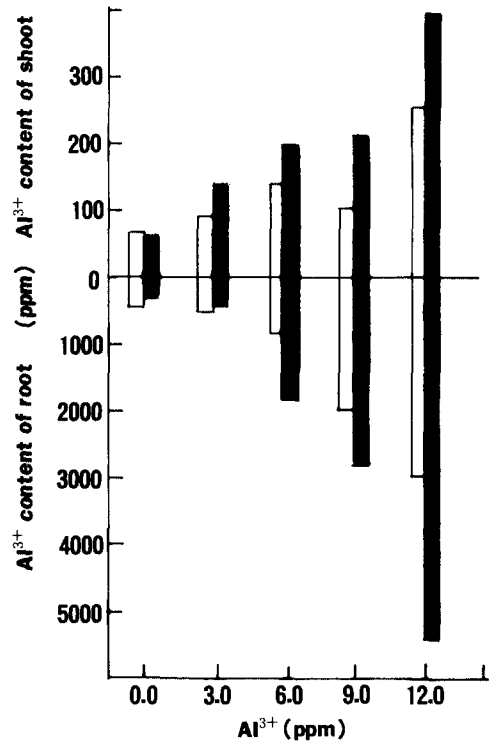


Fig. 8. Aluminum contents (ppm of oven-dry weight) in roots and shoots of Suwon 205 and Olmil grown in different Aluminum concentrations. □ ; Suwon 205 ■ ; Olmil

Table 2. The effect of aluminum on the uptake of Al, Ca, Mg, K and P in root and shoot of Suwon 205 and Olmil

Al added (ppm)	Variety	Shoot					Root				
		Al(ppm)	Ca(%)	Mg(%)	K(%)	P(%)	Al(ppm)	Ca(%)	Mg(%)	K(%)	P(%)
0.0	Suwon 205	68.5	0.77	0.054	0.21	0.40	487.0	0.36	0.12	0.64	0.43
	Olmil	66.7	0.67	0.061	0.20	0.28	319.8	0.35	0.12	0.62	0.41
3.0	Suwon 205	93.9	0.74	0.042	0.21	0.26	504.6	0.29	0.11	0.50	0.41
	Olmil	140.8	0.64	0.059	0.24	0.20	466.4	0.16	0.14	0.50	0.30
6.0	Suwon 205	142.4	0.67	0.031	0.22	0.26	854.0	0.26	0.06	0.55	0.26
	Olmil	201.5	0.41	0.057	0.18	0.20	1847.5	0.14	0.07	0.55	0.26
3.0	Suwon 205	108.0	0.51	0.035	0.32	0.21	1839.4	0.24	0.06	0.69	0.26
	Olmil	211.9	0.37	0.055	0.27	0.15	2851.4	0.11	0.05	0.50	0.21
3.0	Suwon 205	257.6	0.38	0.030	0.33	0.21	3033.5	0.13	0.04	0.81	0.34
	Olmil	396.9	0.20	0.053	0.32	0.18	5432.9	0.06	0.06	0.49	0.20

P의 용해성이 감소되어 다소 비운동성으로 되었기 때문이다(Randall and Vose, 1962).

Mg의 흡수량도 두 품종에서 모두 감소되었으며, 특히 올밀의 뿌리에서 감소는 현저했다.

K의 흡수량은 올밀의 뿌리만을 제외하고는 Al농도가 증가됨에 따라 증가했으므로, 뿌리의 K 흡수능의 차이는 Al 내성과 관계가 있다고 사료된다.

NH₄⁺-N의 농도가 Al 내성에 미치는 영향

배양액의 pH는 용액중의 NH₄⁺-N의 비에 영향받았다(Fig. 9, Fig. 10).

0 NH₄⁺-N용액에서 두 품종의 pH는 처음 4일동안 5.4로부터 5.0이상으로 증가되었으며, 생장 기간 동안 계속 증가했으나, 용액중의 NH₄⁺-N의 농도가 증가됨에 따라 pH의 증가율은 감소되었다.

Al에 예민한 올밀의 pH는 NH₄⁺-N의 모든 농도에서 Al에 내성이 강한 수원 205보다 더 낮았으며, pH의 증가속도도 느렸다.

Fleming(1983)은 NH₄⁺-N을 포함한 Al 용액은 NH₃-N의 흡수를 방해하여 pH증가율을 감소시켜 식물체에 피해를 초래하며, 이러한 피해는 Al에 민감한 품종에서 더욱 현저하게 나타난다고 보고했다.

본 실험에서는 NH₃-N의 흡수량은 조사하지 못했으나, Al에 예민한 올밀은 뿌리의 NH₄⁺-N 흡수율이 Al에 내성이 강한 수원 205보다 커서 NH₃-N에 비해 더 많은 NH₃-N을 흡수하여 배양액의 낮은 pH를 유도하였다고 사료된다.

대조구에서 두 품종의 생체량은 NH₄⁺-N 농도에 영향을 받지 않았으나 Al 용액에서의 결과는 달랐다(Table 3).

수원 205와 올밀의 지상부 생체량은 NH₄⁺-N의 농도가 증가됨에 따라 다소 증가했고 뿌리의 생체량은 감소했으나, 유의성은 없었다.

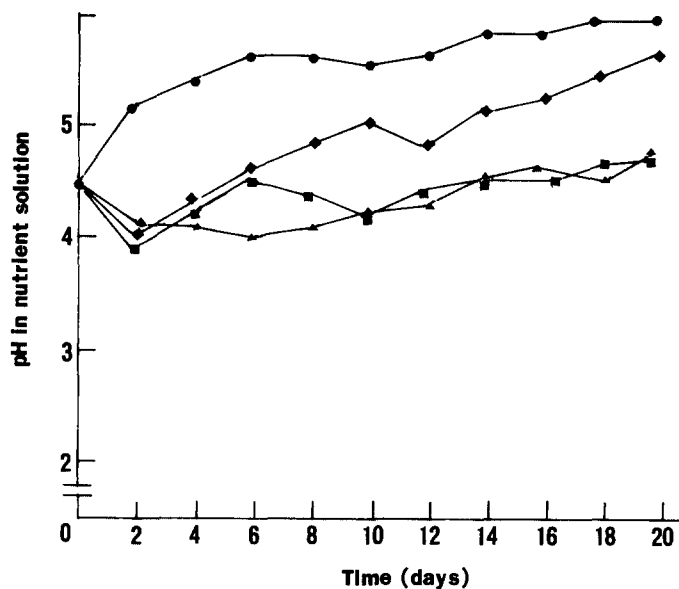


Fig. 9. Changes in pH of Suwon 205 grown in nutrient solutions containing various concentrations of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ plus 9ppm Aluminum.

●:0 NH_4 , ◆:10 NH_4 , ■:30 NH_4 , ▲:50 NH_4

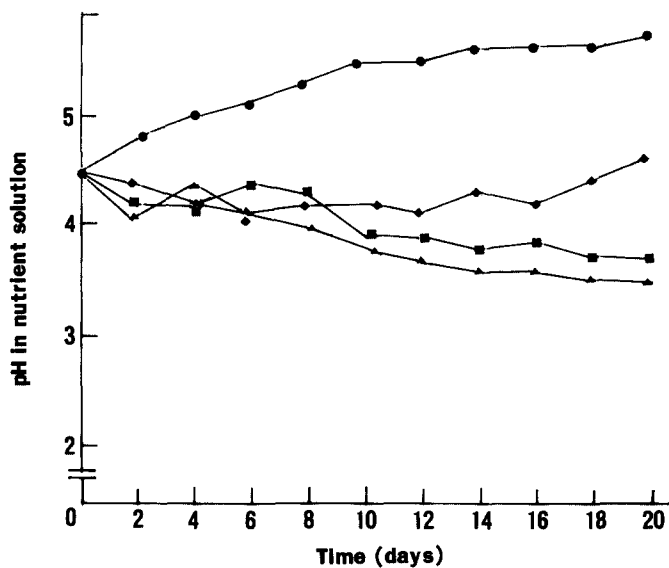


Fig. 10. Changes in pH of 01mil grown in nutrient solutions containing various concentrations of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ plus 9ppm Aluminum.

●:0 NH_4 , ◆:10 NH_4 , ■:30 NH_4 , ▲:50 NH_4

Table 3. The effect of aluminum $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and Al^{3+} on the growth of Suwon 205 and Olmil in nutrient solutions

Variety	NH_4^+ (%)	Dry weight of roots (g/10indi.)			Dry weight of shoots (g/10indi.)		
		OA1^{3+}	9ppm Al^{3+}	Relative dry weight (Al/OA1)	OA1^{3+}	9ppm Al^{3+}	Relative dry weight (Al/OA1)
Suwon 205	0	0.184	0.158	97.8	0.238	0.229	96.2
	10	0.154	0.120	77.9	0.271	0.235	86.7
	30	0.165	0.120	72.7	0.237	0.202	85.4
	50	0.134	0.098	67.2	0.277	0.291	77.2
Olmil	0	0.163	0.125	76.7	0.236	0.216	91.5
	10	0.150	0.083	55.3	0.418	0.346	82.8
	30	0.159	0.075	47.2	0.293	0.202	69.1
	50	0.133	0.054	40.6	0.388	0.200	51.5

Al 용액에서 두 품종의 뿌리의 생체량은 지상부와는 달리 $\text{HN}_4^+\text{-H}$ 농도에 따라 유의적으로 감소했다($F=31.5$, $p<0.01$.)

Ca, Mg, K 및 P의 흡수도 용액중의 Al과 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 에 의해 감소되었다(Table 4). 영양염류의 흡수는 Al 또는 $\text{HN}_4^+\text{-H}$ 용액에서 성장한 품종에서 보다 Al과 $\text{HN}_4^+\text{-H}$ 으로 처리된 용액에서 성장한 품종에서 더욱 감소되었는데 이는 용액에서 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도의 증가가 Al 독성을 더 크게 하였기 때문이다(Fleming, 1983).

Kirkby(1968)은 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 용액에서 성장시킨 겨자의 영양염류 흡수는 감소했는데, 이는 초과 흡수된 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 때문에 다량의 H^+ 가 배양액으로 방출되어 낮아진 pH하에서 영양염류의 분해가 억제되었기 때문이라고 보고했다.

Table 4. The effect of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and Al^{3+} on the uptake and distribution of nutrients in Suwon 205 and Olmil

Variety	Treatment		Ca(%)		Mg(%)		K(%)		P(%)	
	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ (%)	Al^{3+} (ppm)	Total uptake	Percent in root	Total uptake	Percent in root	Total uptake	Percent in root	Total uptake	Percent in root
Suwon 205	0	0	2.39	28	0.25	36	4.49	44	1.26	32
		9	1.91	29	0.21	27	4.51	53	0.82	45
	30	0	2.32	31	0.28	56	2.60	35	0.97	36
		9	1.61	25	0.26	33	2.46	34	0.72	35
	0	0	2.15	25	0.31	53	4.23	42	1.38	35
		9	1.32	21	0.23	59	4.15	23	1.19	44
Olmil	0	0	1.86	18	0.26	49	2.90	20	0.74	38
	30	9	1.10	9	0.18	21	2.40	11	0.55	12

Ca²⁺의 농도가 Al의 내성에 미치는 영향

대조구 또는 Al 9ppm 처리구 용액에서 Ca²⁺의 농도가 증가됨에 따라 두 품종의 생체량은 모두 증가했다(Table 5.)

Table 5. The effect of calcium on dry weight of shoot and root in Suwon 205 and Olmil grown in nutrient solutions containing various concentration of Ca²⁺ plus 9ppm aluminum

Variety	Ca ²⁺ (ppm)	Shoot dry weight(g / 10indi.)			Root dry weight(g / 10indi.)		
		OA1 ³⁺	9ppmAl ³⁺	Relative dry weight (A1/OA1)	OA1 ³⁺	9ppmAl ³⁺	Relative dry weight (A1/OA1)
Suwon 205	0.0	0.75	0.31	0.42	0.17	0.11	0.65
	2.0	0.64	0.34	0.53	0.16	0.11	0.69
	8.0	0.97	0.44	0.45	0.21	0.13	0.62
	16.0	0.84	0.46	0.55	0.26	0.18	0.63
	32.0	0.89	0.61	0.69	0.24	0.20	0.83
	50.0	0.87	0.64	0.73	0.26	0.22	0.85
Olmil	0.0	0.78	0.26	0.33	0.21	0.10	0.52
	2.0	0.79	0.23	0.29	0.22	0.13	0.59
	8.0	0.81	0.30	0.37	0.22	0.11	0.50
	16.0	0.86	0.37	0.43	0.23	0.14	0.61
	32.0	0.83	0.45	0.54	0.24	0.16	0.67
	50.0	0.86	0.58	0.67	0.26	0.18	0.69

Al 용액에서 뿌리의 생체량은 Ca²⁺농도가 증가됨에 따라 유의적으로 증가했으나(F=6.7, p<0.05), 지상부의 반응은 달랐다.

50ppm의 Ca²⁺이 첨가된 Al 용액에서 수원 205의 생체량은 Ca²⁺이 첨가되지 않은 Al 용액에서 보다 뿌리에서 100%, 지상부에서 106%가 증가되었으며, 올밀의 뿌리에서는 80%, 지상부에서는 123%가 증가되었다.

Ca²⁺이 첨가되지 않은 Al 용액에서의 생체량은 Al 무처리구에 비해 수원 205의 뿌리와 지상부에서 각각 35.3%, 57.5%가 감소되었고, 올밀에서는 52.4%, 66.7%가 감소되었다.

Al독성은 용액중의 Ca²⁺농도가 증가됨에 따라 감소하여 Ca²⁺의 50ppm 고농도에서 생장시킨 두 품종의 생체량은 0ppm의 대조구 생체량보다 증가되었으나, Al에 민감한 올밀의 뿌리의 생체량은 내성이 강한 수원 205의 생체량과 같은 정도의 증가율을 나타내지는 않았다. 이는 고농도의 Ca²⁺ 첨가가 Al 독성을 감소시키나(Foy, 1969), 50ppm의 Ca²⁺농도는 Al독성을 완전히 제거하지 못했기 때문이라고 해석된다.

Al 용액에서 Ca²⁺농도의 증가는 Ca, Mg 및 P의 흡수를 증가시켰다(p=0.05)

각 Ca²⁺농도에서 영양염류의 상대흡수율은 올밀에서 더욱 크게 나타났는데(Table 6, Table 7), 이는 Ca²⁺이 영양염류 흡수에 대한 Al의 저해작용을 감소시켰기 때문으로 사료된다.

Table 6. The effect of Al^{3+} on the uptake of Ca, Mg, K and P in Suwon 205

Treatment (ppm)		Ca(%)		Mg(%)		K(%)		P(%)	
Ca ²⁺	Al ³⁺	Total uptake	Relative uptake (A1/OA1)	Total uptake	Relative uptake (A1/OA1)	Total uptake	Relative uptake (A1/OA1)	Total uptake	Relative uptake (A1/OA1)
	0	0.44		0.12		0.72		0.57	
0			72.7		91.7		72.2		66.7
	9	0.32		0.11		0.52		0.38	
	0	0.45		0.14		0.80		0.60	
2			77.8		71.4		75.0		66.7
	9	0.35		0.10		0.60		0.40	
	0	0.56		0.12		0.69		0.56	
8			73.2		100.0		81.2		80.4
	9	0.41		0.12		0.56		0.45	
	0	0.58		0.16		0.74		0.55	
16			80.1		87.5		75.7		90.9
	9	0.47		0.41		0.56		0.50	
	0	0.61		0.14		0.77		0.58	
32			83.6		107.1		72.7		93.1
	0	0.51		0.15		0.56		0.54	
	0	1.05		0.17		0.72		0.65	
50			73.3		111.8		84.7		103.1
	9	0.77		0.19		0.61		0.67	

Table 7. The effect of Ca^{2+} and Al^{3+} on the uptake of Ca, Mg, K and P in Olmil

Treatment (ppm)		Ca(%)		Mg(%)		K(%)		P(%)	
Ca ²⁺	Al ³⁺	Total uptake	Relative uptake (A1/OA1)	Total uptake	Relative uptake (A1/OA1)	Total uptake	Relative uptake (A1/OA1)	Total uptake	Relative uptake (A1/OA1)
	0	0.55		0.15		0.75		0.57	
0			27.3		60.0		52.0		35.1
	9	0.15		0.09		0.39		0.20	
	0	0.53		0.16		0.71		0.59	
2			43.4		68.8		67.6		47.5
	9	0.23		0.11		0.48		0.28	
	0	0.57		0.18		0.78		0.56	
8			52.6		66.7		70.5		64.3
	9	0.30		0.12		0.55		0.36	

Table 7. Continued

Treatment (ppm)	Ca(%)		Mg(%)		K(%)		P(%)			
	Ca ²⁺	Al ³⁺	Total uptake	Relative uptake (A1/OA1)	Total uptake	Relative uptake (A1/OA1)	Total uptake	Relative uptake (A1/OA1)		
16		0	0.59		0.16		0.82		0.60	
				44.1		62.5		65.9		53.3
		9	0.26		0.10		0.54		0.32	
32		0	0.67		0.19		0.88		0.72	
				49.3		73.7		61.4		51.4
		9	0.33		0.14		0.54		0.37	
50		0	1.10		0.19		0.73		0.53	
				42.7		89.5		76.7		79.2
		9	0.47		0.17		0.56		0.42	

요 약

밀의 두 품종인 수원 205와 올밀의 Al에 대한 내성의 차이와 이에 대한 NH₄-N과 Ca²⁺의 효과를 조사한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. Al의 모든 농도 구간에서 수원 205는 올밀보다 높은 pH를 나타냈으며, 뿌리의 신장능도 컸다. 생체량 및 영양소, 특히 Ca과 P의 흡수율도 올밀에 비해 수원 205에서 더욱 높았다. 이 결과 수원 205는 올밀보다 Al의 내성이 더 큰 품종이라고 할 수 있다.
2. NH₄-N은 Al의 독성을 더욱 증가시켰으며, 이는 Al에 내성이 강한 수원 205보다 Al에 예민한 올밀에서 더욱 현저하게 나타났다.
3. Ca²⁺의 농도가 2ppm에서 50ppm으로 증가됨에 따라서 Al의 독성은 감소되었으나, Ca²⁺의 저농도에서 Al의 독성은 올밀에서 더욱 심하게 나타났다.

인용문헌

- 金鳳九·鄭吉雄·蔡宰天·黃鍾珍. 1982. 小麥의 耐酸性 簡易檢定方法과 品種間 差異, 韓育誌, 14:319-26.
- 黃鍾珍·曹章煥·洪丙憲. 1984. 酸性土壤과 Aluminum 營養液을 利用한 小麥 耐酸性 品種 選拔 方法에 關한 研究, 韓育誌, 16(1):90-98.
- 高木洋子·生井兵治·村上實一. 1981. ヘマトキシリン染色によるユムニギのアルミニウム耐性 檢定法の評價, 育種學雜誌, 31:151-60.
- 東駿沈·佐本啓智·籠橋悟. 1954. 酸性土壤に於ける麥類の根の發育不良とその品種間差異, 東海 近畿農業試驗場研究第一號:152-55.
- Cate, R.B., Jr. and A.P. Sukhai. 1964. A study of aluminum in rice, Brit. Guiana Soil

- Survey. Soil Sci., 98:85-93.
- Clarkson, D.T. 1966a. Aluminum tolerance in species with the genus *Agrostis*' J. Ecol., 54:167-78.
- Clarkson, D.T. 1966b. Effect of aluminum on the uptake and metabolism of phosphorus by barley seedlings, Plant Physiol., 41:165-72.
- Clarkson, D.T. 1967b. Phosphorus supply and growth rate in species of *Agrostis* L., J. Ecol., 55:111-18.
- David, A. Reid. A.L. Fleming, and C.D. Foy . 1971. A method for determining Aluminum response Barley in nutrient solution in comparison to response in Al-toxic soil, Agron. Jour., 63:600-3.
- Dessureaux, L. 1969. Effect of aluminum on alfalfa seedling. Plant Soil, 30:93-97.
- Dodge, C.S. and A.J. Miatt. 1972. Relationship of pH to ion uptake imbalance by varieties of wheat (*Triticum vulgare*). Argon. Jour., 64:476-81.
- Fleming, A.E. 1983. Ammonium uptake by wheat varieties differing in Al tolerance, Agron. Jour., 75:726-30.
- Foy, C.D. and J.C. Brown. 1963. Toxic factors in acid soils. I. Characterization of aluminum toxicity in cotton, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 27:403-7.
- Foy, C.D., J.C. Brown. 1964. Toxic factors in acid soils. II. Differential Al tolerance of plant species, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 28:27-32.
- Foy, C.D., W.H. Armiger, L.W. Briggie, and d.A. Reid. 1965. differential aluminum tolerance of wheat and barley in acid soils. Agron, Jour., 57:413-47.
- Foy, C.D., A.L. Fleming, G.R. Burns, and J.C. Brown. 1965. differential Aluminum tolerance of two wheat varieties associated with plant-induced pH changes around their roots, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 29:64-67.
- Foy, C.D., A.L. Fleming, G.R. Burns, and W.H. Armiger. 1967. characterization of differential aluminum tolerance among varieties of wheat and barley, Soil. Sci. Soc. Amer. Proc., 31:513-20.
- Foy, C.D., W.H. Armiger, A.L. Fleming, and W.J. Zaumeyer. 1967. Differential tolerance of dry bean, snapbean, and limabean varieties to an acid soil high in exchangeable aluminum, Agron. Jour., 59:561-63.
- Foy, C.D., A.L. Fleming, and W.H. Armiger. 1969. Aluminum tolerance of soybean varieties in relation to calcium nutrition. Agron. Jour., 61:505-11.
- Foy, C.D., A.L. Fleming., and J.W. Schwartz. 1973. Opposite aluminum and manganese tolerance of two wheat varieties. Agron. Jour., 65:123-26.
- Foy, C.D., H.N. Lafever, J.W. Schwartz, and A.L. Fleming. 1974. Aliminum tolerance of wheat cultivars related to region of origin, Agron. Jour., 66:751-58.
- Jonson, R.E. and W.A. Jackson. 1964. Calcium uptake and transport by wheat seedlings as affected by aluminum. Soil Soc. Amer. Proc., 28:381-86.
- Kirkby, E.A. 1968 . Influence of ammonium and nitrate nutrition on the cation-anion bal-

- ance and nitrogen and carbohydrate metabolism of white mustard plants grown in dilute nutrient solutions. *Soil Sci.*, 105:133-41.
- Lafever, H.N., L.G. Campbell, and C.D. Foy.1977. Differential response of wheat cultivars to Al. *Agron. Jour.*, 69:751-58.
- Long, F.L., G.W. Langdale, and D.L. Myhre.1973. Response of an Al-tolerant and an Al-sensitive genotypes to Lime, P, and K on three atlantic coast flatwoods soils. *Agron. Jour.*, 65:30-34.
- Martini, J.A., R.A. Kochann, E.P. Gomes, and F. Langer.1977. Response of wheat cultivars to liming in some high Al. *Agron. Jour.*, 69:612-16.
- Mugwira, L.H., S.M. Elgawhary, and K.I. Patal.1976. Differential tolerance to Triticale, Wheat, Rye, and Barley to Aluminum in nutrient solution. *Agron. Jour.*, 68:782-86.
- Mugwira, L.H., V.T. Sapra, S.U. Patal, and M.A. Choudry.1981. Aluminum tolerance of triticale and wheat cultivars developed in different regions. *Agron. Jour.*, 73:407-75.
- Neenan, M. 1960. The effects of soil acidity on the growth of cereals with particular referance to the differential reaction of varieties thereto. *Plant Soil.*, 12:324-38.
- Paterson, J.W. 1965. The effect of aluminum on the absorption and translocation of calcium and other elements in young corn, Ph.D. Thesis. Pennsylvania State University(1964). 25:6142-43.
- Polle, E., C.F. Konzak, and J.A. Kittrick.1978. Rapid screening of wheat for tolerance to Aluminum in breeding varieties better adapted to acid soils. I. In technical series bulletin No. 21. Washinton, E.C. Office of Agriculture Development Support Bureau Agency for International Development.
- Randall, P.J. and P.B. Vose.1962. Effect of Aluminum on Uptake & Translocation of Phosphorus by Perennial Ryegrass. *Plant Physiol.*, 38:403-9.

(1992年 4月 29日 接受)