

자연대기수준의 오존농도가 동진벼의 수량에 미치는 영향

허재선* · 이충일¹

순천대학교 사범대학 환경교육학과, ¹포항산업과학연구원 환경보전연구팀

Effects of Ambient Ozone Levels on Rice Yield

Jae Seoun Hur and Choong Il Lee¹

Department of Environmental Education, Suncheon National University, Suncheon, Chunnam 540-742, Korea
¹Environmental Conservation Research Team, Research Institute of Industrial Science and Technology(RIST),
Chunnam 545-090, Korea

ABSTRACT: Open-top field chamber study was carried out to investigate effect of ambient ozone level on the yield of rice cultivar 'Dongjin' in Kwangyang area located in the vicinity of the industrial complex of Yechon petroleum refinery and chemical works or Kwangyang Iron and Steel works during the summer of 1997. Mean ozone concentration of ambient air during daytime (9:00-17:00) was revealed to exceed over 40 ppb which is defined to be a critical level causing plant injury and yield reduction in Europe. Yield component analysis showed that there was no significant difference in rice yield between ambient air and charcoal-filtered air. The results suggest that the ambient ozone levels during the exposure period had no effect on yield reduction of rice cultivar 'Dongjin' and it is likely that the cultivar is tolerant to ambient ozone levels.

Key words: Open-top field chamber, ozone, rice, yield reduction.

지난 30여년 동안 급속한 산업화와 공업화가 진행됨에 따라 국내의 대기질(大氣質)은 계속적으로 악화되고 있는 상황에서 대규모 공단 주변지역에서는 대기오염과 관련한 농작물 피해의 가능성이 상존하고 있다(14). 또한 현재 국내 주요작물에 대한 대기오염 피해를 정량적으로 산출할 수 있는 자료가 부족하여 대기오염에 의한 농작물 피해를 정확하게 산정하기는 어려우나 미국의 경우(4) 대기오염에 의한 농작물의 경제적 피해가 매년 \$1~\$5 billion 정도로 조사되어 국내에서도 상당한 경제적 손실이 발생할 것으로 추측되고 있다. 특히 농작물에 피해를 일으킬 수 있는 오존(O₃)의 한계 농도로 국제적으로 인정된 AOT40(Accumulated exposure Over a Threshold of 40 ppb) 농도수준은 국내의 공업단지는 물론 대도시와 고속도로 주변과 같이 교통량이 많은 지역에서 작물 생육기인 4월에서 9월 사이에 빈번하게 관측되고 있으므로 국내의 주요 작물에서도 대기오염원의 피해가 발생할 가능성이 매우 높다고 할 수 있겠다. 하지만 대기오염에 의한 작물피해 및 수량감소에 대한 연구 부족으로 정확한 피해정도에 대한 파악이 이루어지지 않고 있는 실정에서 예방의 필요성 또한 무의식적으로 간과되고 있다고 하겠다.

국내 주요 작물에 대한 대기오염원의 피해 연구(14)는 주로 울산이나 여천과 같은 공단주변지역을 중심으로 지역대기환경에 의한 농작물의 수량감소에 대하여 진행되었는데 이는 비교적 오염원의 농도가 낮은 지역에 대비하거나 전국 평균수량에 대한 비교를 통하여 피해예상지역의 잠정적인 수량감소를 추정하는 방법으로 진행되어 왔다. 하지만 위와 같은 조사의 경우 대기오염원의 영향 이외에도 작물의 특성, 품종, 재배방법 및 기타 환경인자와 같은 요인의 영향을 배제할 수 없어 지역대기환경에 의한 작물의 피해를 정확하게 산출하는 데는 많은 문제점이 있다.

국내 재배 중인 벼 16품종에 대한 0.15 ppm 오존을 1시간 동안 인위적으로 노출한 연구결과에 의하면(8) 품종에 따른 차이가 심하였지만 오존에 의한 식물 피해가 뚜렷하지 않은 것으로 조사되었다. 하지만 파키스탄의 경우(15) 지역대기의 오존(O₃)에 의한 감수성 벼품종의 수량 감소가 37~42%에 달할 정도로 피해가 심각한 것으로 나타났으며 일본의 경우(10) 0.15 ppm의 오존을 노출한 경우에도 벼에서 가시피해는 물론 수량감소가 발생하는 것으로 보고되고 있어 국내의 대기환경조건에서 벼 생육기 동안의 오존 농도가 벼의 수량감소를 일으킬 가능성 매우 높을 것으로 여겨지나 이에 대한 국내의 연구가 부족하여 정확한 현상 파악이 이루어지지 않은 상태이다.

*Corresponding author.

본 연구에서는 국내에서 최초로 자연생육상태에서 open-top field chamber를 이용한 여과대기와 지역대기 간의 인위적 비교 노출을 실시하여 벼 생육기간의 공단 주변 지역대기환경 오존 수준이 동진벼의 수량감소에 미치는 영향에 대하여 조사하였다.

재료 및 방법

조사지역. 본 연구는 1997년에 전남 광양지역(북위 34°56', 동경 127°42')에서 벼 생육기간인 8월 10일부터 10월 10일까지 실시하였다. 조사지역 주변에는 남쪽으로 여천 석유화학단지가 동쪽으로는 광양제철소가 반경 8 km 이내에 위치에 있다.

식물재료 준비 및 관리. 본 연구에서는 동진벼를 공시품종으로 이용하였다. 일반 경작지에서 이앙하여 재배한 벼를 7월 29일에 사각 포트(20×20×20 cm)에 이식하였다. 각 포트 당 3포기의 벼를 이식하여 10일 동안 자연상태에서 적응시킨 후 open-top field chamber로 옮긴 후 8월 10일부터 노출을 실시하였다. 자연대기와 여과대기 노출 chamber 각각에 28개의 pot, 총 84포기의 벼를 배치하였다. 토양은 벼를 재배하던 일반 경작지 토양을 그대로 이용하였으며 포트 이식 직후 복합비료(20:7.41:14.1 = N:P:K)를 2.2 g/pot로 시비하였으며 이후 Hoagland's solution(1/2×, EC 1.0 mS/cm)을 2~3일 간격으로 관수하였다. 노출 chamber의 영향을 최소화하기 위하여 10일 간격으로 포트를 재배치하였다. 노출이 끝난 후 각 처리 chamber 별로 벼의 수량구성요소인 총분얼수, 유효분얼수, 이삭당 영화수, 등숙율, 친립중을 조사하였으며 정기적으로 가시피해 발생 유무도 조사하였다.

Open-top field chamber를 이용한 대기노출. 동진벼 수량에 대한 지역대기환경의 영향을 조사하기 위하여 자연상태를 최대한으로 모사한 open-top field chamber를 이용하였다. 일반 실내 growth chamber 노출장치를 이용한 대기오염 실험의 경우 많은 환경인자들이 인위적으로 설정되고 광량, 온도, 습도와 같은 환경조건들이 매우 안정적이기 때문에 얻어진 결과들을 자연상태에서 일어나는 현상으로 바로 적용하는 데는 한계가 있다(6). 이와 같은 실내 growth chamber 노출장치의 제한성을 해결하기 위하여 자연상태의 환경조건에서 노출공간이 자연대기와 격리될 수 있는 개두형(開頭形) open-top field chamber를 본 실험에 적용하였다. 본 chamber는 직경 3 m, 높이 2.4 m의 원통형으로 aluminum dicasting frame에 두께 4 mm의 유리로 외피를 씌웠으며 상층의 개두율(top open rate)은 면적비 50%로 설계되었다. 외부공기는 강압식으로 출력 400 W 대형 fan에 의하여 풍량 4,320 m³/hr으로 chamber 안으로 유입되어 chamber 하부 주변부를 따라 설치된 vinyl duct 통하여 골고루 분산되게

한 후 상부 개두구를 통하여 빠져나가게 하였다. 자연대기에서 대기오염원을 제거한 여과대기 처리를 위하여 외부공기 흡입부에 고급 활성탄을 채운 활성탄 mat(600×1000×10 mm)를 통과한 대기를 여과대기로 이용하였으며 10개의 활성탄 mat를 커튼식으로 직렬 배열하여 활성탄 mat에 의한 공기저항을 최소화하였다. 자연대기의 경우 동일한 공기저항(풍속 2.5 m/s)을 유도하기 위하여 활성탄 대신에 nylon 집진 부직포를 동일한 방식으로 배열하였으며 활성탄의 제거 효율이 50% 이하로 떨어질 경우 새로운 활성탄을 충전 교환하였다. 노출기간동안 chamber 내의 온도가 외기에 비하여 2~3°C 정도 높았으며 필요할 경우 특별한 냉각장치 대신에 수막 냉각을 실시하였다. 여과대기와 자연대기의 오존농도 측정은 자외선 분광법을 적용한 오존측정기(ozone analyzer model-806, KIMOTO)를 이용하였다. 에틸렌gas(C₂H₄, 7% in N₂ balance)를 측정기 운영 gas로 이용하였으며, 10일 간격으로 영점조절을 실시하였다. 각 chamber로부터 매 분마다 측정된 오존농도는 자동연산프로그램을 이용하여 1시간 평균치로 출력하였으며, 대기 sampling line(Teflon tubing)은 chamber 중앙부에 위치한 식물체 정단부 30 cm 위에 설치하여 측정하였다.

결과 및 고찰

조사지역에서 여름철 풍향 빈도는 남풍계열이 약 40%, 동풍과 북풍계열이 각각 25% 정도로 주풍이 남풍계열로 나타났다. 대기의 수직운동을 좌우하는 대기안정도면에서 대기오염확산에 유리한 1, 2등급이 가장 자주 나타나고 농도의 대기 오염원이 집적될 가능성이 적은 것으로 나타났다. 노출기간의 기상자료는 Table 1에 나타나 있다. 한편 본 조사지역의 지난 6년간(1993~1998)의 SO₂, NO₂와 O₃의 연간 평균농도는 Table 2에 나타나 있다(환경부 영산강환경관리청 제공, 전라남도 광양시 중동 측정소 자료).

1997년 8월 20일부터 10월 10까지 광양지역의 자연대기에서 조사된 주간(9:00~17:00) 평균 오존농도는 Fig. 1에 나타나 있다. 조사기간동안 자연대기의 주간 8시간 평균 최고농도는 98.8 ppb, 최저 농도는 24 ppb이었으며

Table 1. Climatological data in Kwangyang area during the exposure periods (11/08/97~10/10/97)

1. Daily mean temperature	
(a) Daily maximum mean temperature (°C)	27.5
(b) Daily minimum mean temperature (°C)	18.6
(c) Daily mean temperature (°C)	23.1
2. Daily mean light intensity (J/cm ²)	1257.6
3. Daily maximum wind speed (m/sec)	3.62
4. Number of rainy days	6.0

Table 2. Annual mean concentrations of air pollutants in Kwangyang area for the last 6 years (courtesy of Korean Ministry of Environment)

Year	Levels of air pollutants (ppb)		
	O ₃	SO ₂	NO ₂
1993	25	12	12
1994	23	11	18
1995	27	13	20
1996	26	11	16
1997	24	11	14
1998	27	12	14

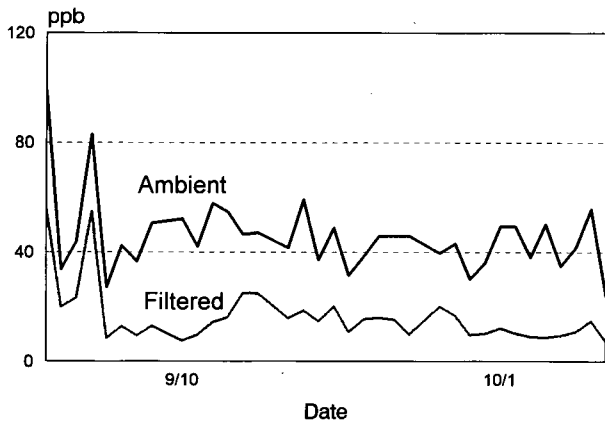


Fig. 1. Ozone levels of daytime (9:00~17:00) in ambient air or activated charcoal filtered air in Kwangyang region during the exposure periods.

광양지역 자연대기의 전체 주간 평균오존농도는 45.9 ppb로 조사되어 유럽에서 피해유발 한계 오존농도로 설정한 40 ppb를 상회한 것으로 나타났다. 이에 비하여 동일 자연대기를 활성탄으로 여과한 여과대기의 주간 8시간 평균 최고오존농도는 55.7 ppb, 최저농도는 7.3 ppb, 전체 평균오존농도는 16.4 ppb로 여과대기의 오존 수준은 자연대기의 36% 정도로 조사되었다. 작물 피해와 관련된 오존농도는 주로 주간의 오존 수준과 직접적인 관련이 있다(16). 즉 오존은 대기 중에 존재하는 질소산화물과 탄화수소가 광화학반응을 일으켜 생성되는 2차 오염원이기 때문에 강한 태양광선이 존재하는 주간, 계절적으로 북반구에서는 여름철에 매우 높은 특성을 지니고 있다(3). 또한 대기오염원에 의한 작물피해는 일단 대기오염원이 기공을 통하여 식물체 내로 유입된 이후에 발생할 수 있으므로 광합성이 활발한 주간, 기공을 통한 대기오염원의 유입이 작물에 피해를 일으킬 가능성이 높다고 하겠다. 그러므로 아무리 높은 수준의 오존이 24시간 존재한다고 하더라도 식물체로 유입이 원활하지 못하는 미기상학적 조건과 식물 생리적 반응 조건에서는 피해 가능성이 적다고 하겠다. 이런 의미에서 오존의 경우 아황산가스 같은 대기오염원과는 달리 주간의 농도가 식

물체에 피해를 유발할 수 있는 보다 직접적인 의미를 지니고 있다고 하겠다.

작물에 피해를 유발할 수 있는 오존농도 설정을 위하여 지난 30년간 많은 연구가 진행되어져 왔으며 가장 최근에 채택되어 유럽에서 대기환경관리정책에 이용되는 것으로 AOT40(accumulated exposure over a threshold)을 들 수 있다(6). 즉 많은 연구결과, 오존에 의하여 영향을 받을 수 있는 모든 사물에 대하여 피해가 일어날 수 있는 한계오존농도로 40 ppb를 설정한 것이다. 일반적으로 일일 최고 오존농도는 오존 10시부터 오후 4시 사이에 나타나지만 40 ppb 이상 농도의 오존 존재 시간은 위의 시간 이외에도 측정되고 있다(5). 1997년 광양지역의 자연대기의 주간 평균오존농도가 40 ppb를 상회한 것으로 조사되어 실제로 작물에 피해를 유발할 수 있는 수준의 오존이 존재하였다는 것을 알 수 있다(Fig. 1). 하지만 노출기간동안 자연대기에 노출된 동진벼에서 뚜렷한 오존의 가시피해는 살펴 볼 수 없었다. 일본에서 행한 연구결과에 의하면(10) 벼는 오존에 어느 정도 내성이 강한 식물로 여겨지고 있으며 150 ppb 오존에 노출된 벼에서 가시피해가 발현되는 것으로 알려지고 있다. 이는 조사기간 동안 광양지역에서 측정된 주간 8시간 평균오존농도보다 훨씬 높은 농도임을 알 수 있었다. 비가시적 피해로 여겨지는 수량감소를 알아보기 위하여 동진벼의 수량에 미친 지역대기의 오존 수준의 영향을 살펴 본 결과는 Table 3에 나타나 있다.

벼의 주요 수량구성인 수당 영화수, 등숙율, 천립중에 대하여 자연대기와 여과대기에 노출된 벼를 비교하여 보면 대체적으로 자연대기에서 자란 벼의 수량구성요소가 약간 높게 나타났지만 통계적으로 유의한 차이를 찾아 볼 수 없었다. 주당수수의 경우 자연대기에서 자란 벼가 여과대기에서 자란 벼보다 통계적으로 유의하게 높게 나타났다. 정조수량으로 비교할 경우 여과대기에서 자란 벼의 정조수량이 650.9 kg/10a인데 반하여 자연대기에서 자란 벼의 정조수량은 678.0 kg/10a으로 오히려 더 많은 것으로 산출되었다. 전체적으로 두 대기처리간의 유의한 차이는 찾아볼 수 없었지만 여과대기에서 자란 벼보다는 자연대기에서 자란 벼가 전체 수량면에서 조금 높은 것으로 조사되었다. 이는 아마도 자연대기에 노출

Table 3. Yield analysis of rice cultivar, 'Dongjin', exposed to ambient air or activated charcoal-filtered air in Kwangyang area during the summer of 1997

Components	Filtered air	Ambient air
1. No. of panicles/hill	13.1±0.59	15.0±0.63
2. No. of grains/spiklet	88.5±2.16	89.9±2.34
3. Percent of filled-grains	89.4±2.48	89.7±1.30
4. Wt. of 1000 grains (g)	26.0±0.25	26.4±0.25
5. Rough rice yield (kg/10a)	650.9	678.0

된 동진벼의 주당수수(유효분얼수)가 여과대기에서 자란 동진 벼보다 높았기 때문인 것으로 풀이된다. Wahid (15) 등은 파키스탄에서 주간 6시간 동안 평균 오존농도 33~55 ppb의 자연대기에 노출된 민감성 벼품종의 조사에서 최고 42%의 수량감소를 보고하였으며 여과대기에 비하여 자연대기에 노출된 벼에서 천립중 감소도 뚜렷하였지만 주당수수의 감소가 주된 수량감소 요인이라고 보고하였다. 하지만 본 연구의 경우 주당수수가 여과대기에 비하여 자연대기에 노출된 동진벼의 경우 높게 조사되어 상반된 결과를 보였다. 본 실험에서 동진벼에 비교 노출을 실시하기 시작한 시기가 8월 초순으로 남부지방 생육조건에서 이 시기에 대부분 벼는 유효분얼종지와 최고분얼기를 끝낸 상태이므로 주당수수에 대한 두 처리간의 유의한 차이는 노출된 대기 오염원에 의한 차이보다는 자연상태 포장에서 포트로 이식하는 과정에서 발생한 실험적 오차에 의한 것이라고 해석될 수 있다. 즉 자연대기에서 자란 동진벼의 유효분얼수가 15.0으로 여과대기에서 자란 동진벼의 유효분얼수인 13.1보다 높았지만 총분얼수에 대한 유효분얼수인 유효분얼율은 각각 84.0%(지역대기)와 84.8%(여과대기)로 차이가 없었으므로 두 처리간의 유효분얼수의 차이는 노출대기의 종류에 의한 차이가 아님을 알 수 있었다. 그러므로 여과대기에서 보다 자연대기에서 자란 동진벼의 수량이 양호했던 이유가 노출대기의 차이보다는 실험적 오차에 의한 차이 때문이었으며 1997년 벼 생육기간 동안 전남 광양지역 자연대기수준의 오존은 동진벼 수량 감소에 영향이 없었음을 알 수 있었다.

오존에 의한 광합성산물의 이동 추적에 대한 연구에 의하면(11), 출수개화기부터 결실기 사이에 50 또는 100 ppb에 노출된 벼에서 광합성산물을 생성하는 잎으로부터 이삭이나 뿌리로의 대사산물의 이동이 촉진되며 이러한 대사산물의 이동 추적 변화는 오존노출에 따른 벼 식물체 전체 생물량 감소상태에서 종자의 조기결실을 유도하므로서 제한된 생물량 생산 조건에서도 생식생장단계를 완결 지을 수 있도록 하는 식물체의 환경스트레스 적응 방법이라고 설명하고 있으며 궁극적으로는 오존 노출에 따른 수량 감소를 최소화하는 식물체의 기작이라고 보고하였다. 이것이 사실이라면 본 연구 결과에서 나타난 것처럼 자연대기에 노출된 동진벼에서의 수량감소가 뚜렷하지 않았던 이유가 이와 같은 식물체의 대기오염 스트레스에 대한 적응의 결과라고 풀이될 수도 있다고 하겠다. 오존에 대한 식물체의 반응은 식물생육단계에 따라 다르며(1, 9), 일반적으로 성숙한 잎(fully expanded leaf)에서 피해가 가장 심한 것으로 알려지고 있으며 이는 오존의 대표적인 피해 중에서 식물체 조기노화(early senescence) 및 조기낙엽이 성숙된 잎에서 가장 심하게 발생한다는 것과 깊은 연관을 가지고 있다(5, 7). 실제로 벼의

경우에 있어서도 영양생장단계보다 생식생장단계에서 오존의 영향을 더 심하게 받는 것으로 알려지고 있다(10). 또한 본 실험에서 적용한 open-top field chamber는 인위적 환경조건 결과와는 달리 자연환경조건과 최대한 유사한 조건에서 실시한 것이므로 실제 포장에서 일어날 수 있는 상황을 잘 반영하고 있다고 하겠다. 실제로 자연대기의 오존수준이 일반적으로 알려진 피해 유발가능수준 이상으로 존재했음(Fig. 1)에도 불구하고 수량에 전혀 영향을 미치지 않았음을 알 수 있었으며 이로부터 동진벼가 비교적 오존에 강한 내성 품종임을 알 수 있었다.

자연대기와 여과대기에 대한 차이에서 고려해야 할 사항으로 다른 오염원의 영향을 생각할 수 있다. 즉 자연대기에는 오존뿐만 아니라 아황산가스, 질소산화물 및 기타 광화학 산화물 등 다양한 오염원이 존재하고 있으며 여러 오염원이 동시에 존재하는 경우 상승효과(synergistic effect)가 나타나는 것으로 알려지고 있지만(13), 이 경우 대부분은 어느 농도 이상의 오염원이 존재하는 경우에 해당하며 일반적인 자연대기 수준의 농도에서는 여러 오염원이 동시에 존재함으로써 나타날 수 있는 상승효과가 거의 없는 것으로 조사되고 있다. 실제로 농작물 수량에 대한 혼합오염원의 장기간 노출에 대한 최근의 연구 종합에 의하면 자연대기 농도에서의 O_3/SO_2 , SO_2/NO_2 , O_3/NO_2 의 혼합대기오염원의 상승효과가 거의 없는 것으로 알려지고 있다(2). 본 조사기간 동안의 SO_2 평균농도가 17.4 ppb, NO_2 평균농도가 18.1 ppb로 측정되었으며(12), 또한 광양지역의 지난 6년간의 SO_2 와 NO_2 의 년평균농도도 각각 11~13 ppb와 12~20 ppb로 조사되었다(Table 2). 그러므로 이와 같은 농도에서 혼합대기오염원에 의한 상승효과는 크게 고려할 필요가 없을 것으로 여겨지며, 자연대기에 노출된 동진 벼의 수량감소가 뚜렷하지 않은 점으로 보아 자연대기에 존재하는 오존과 다른 대기오염원들과의 상승작용에 의한 동진벼의 수량 감소가 일어나지 않은 것으로 생각된다.

국내 재배면적이 넓은 동진벼의 수량에 영향을 미칠 수 있는 오존 수준에 대한 연구가 앞으로 필요할 것으로 여겨지며 궁극적으로는 국내 재배 주요 농작물에 대한 피해한계 오존농도 설정을 위한 전체적인 연구의 필요성이 대두된다고 하겠다.

요 약

전남 광양지역의 자연대기 수준의 오존농도가 동진벼의 수량에 미치는 영향을 조사하기 위하여 1997년 벼 생육기간동안 open-top field chamber 노출 실험을 실시하였다. 식물체에 피해 유발 가능한 주간 8시간 동안의 평균오존농도가 자연대기에 존재했음에도 불구하고 자연대기에서 자란 동진벼와 황성탄으로 여과한 여과대기에서

자란 동진벼 간의 수량에는 차이가 거의 없었으며 동진벼가 오존에 비교적 내성이 강한 품종임을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Asakawa, F., Tanaka, H and Kusaki, S. 1981. Differential impacts among the growth stages of photochemical oxidants on growth and yield of rice cultivars of early and late maturity. *Japan Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 52 : 289-296.
2. Bender, J. and Weigel, H. J. 1994. Crop responses to mixtures of air pollutants. In: air pollution and crop responses in Europe, ed. by H. J. J ger, M, Unsworth, L. de Temmerman and P, Mathy. Air Pollution Research Report 46, CEC, Brussels. pp.445-453.
3. Botkin, D. B. and Keller, E. A. 1995. Environmental science: Earth as a living planet. John Wiley & Sons, INC. N.Y. pp.452-462.
4. Boubel, R. W., Fox, D. L., Turner, D. B. and Stern, A. C. 1994. Fundamentals of air pollution. Academic Press. N. Y. pp.112-116.
5. Cooley, D. R. and Manning, W. J. 1987. The impact of ozone on assimilate partitioning in plants: A review. *Environmental Pollution* 47 : 95-113.
6. Fuhrer, J., Skarby, L. and Ashmore, M. R. 1997. Critical levels for ozone effects on vegetation in Europe. *Environmental Pollution* 97: 91-106.
7. Held, A. A., Mooney, H. A. and Gorham, J. N. 1991. Acclimation to ozone stress in radish: Leaf morphology and photosynthesis. *New phytologist* 118 : 417-423.
8. 정일민, 김광호, 강병화. 1997. 대기오염 및 토양오염에 대한 내성작물 선발과 이용. 제 2회 농업과학심포지움: 식물 환경과학의 발전방향. pp.257-262.
9. Kobayashi, K. and Okada, M. 1995. Effects of ozone on the light use of rice (*Oryza sativa* L.) plants. *Agricultural Ecosystem and Environment* 53 : 1-12.
10. Nakamura, H., Hashimoto, S., Ota, Y. and Nakano, M. 1975. Photochemical oxidants injury in rice plants. 1. Occurrence of photochemical oxidants injury in rice plants. *Proceeding of Crop Science Society of Japan* 44 : 312-319.
11. Nouchi, I., Ito, O., Harazono, Y. and Kouchi, H. 1995. Acceleration of ¹³C-labelled photosynthate partitioning from leaves to panicles in rice plants exposed to chronic ozone at the reproductive stage. *Environmental Pollution* 882 : 53-260.
12. 포항산업과학연구원. 1998. 광양제철소 가동에 따른 대기 오염물질이 주변 육상생태계에 미치는 영향. pp.108-111.
13. Rao, M. A. and Nandi, P. K. 1988. Air pollution mixtures and their effects on plants; A review. *Perspectives in Environmental Botany* 2 : 217-249.
14. 서울시립대학교 수도권개발연구소. 1997. 여천공단 환경오염 대책 마련을 위한 오염 실태 정밀조사 사업(생태). II 농작물분야. 국립환경연구원 보고서.
15. Wahid, A., Maggs, R., Shamsi, S. R. A., Bell, J. N. B. and Ashmore, M. R. 1995. Effects of air pollution on the rice yield in the Pakistan Punjab. *Environmental Pollution* 90 : 323-329.
16. Wellburn, A. R. 1988. Air pollution and acid rain. Longman Science & Technical. UK. pp.40-44.

(Received November 7, 1998)