

대두 개체군에 있어서 CO₂와 O₃ 플럭스

김원식·이호준*

동경대학 생산기술연구소, 건국대학교 이과대학 자연과학부 생명과학전공*

적 요: 1996년 7월 하순부터 9월 하순에 걸쳐 東京農工大學 農學部 附屬府中農場(東京都 府中市)의 大豆(*Glycine max*) 개체군을 대상으로 微氣象學的 플럭스측정방법의 하나인 熱收支法을 이용하여 CO₂ 플럭스와 O₃ 플럭스를 측정하였다. CO₂ 플럭스와 O₃ 플럭스는 葉面積指數(LAI)의 변화에 영향을 받았으며, LAI가 2.0이상일 경우 CO₂ 플럭스는 光合成有效放射量(PAR)과 정비례관계가 있었다. O₃ 플럭스는 측정기간 중 항상 양의 수치를 나타냈으며, 평균치는 0.5 mol m⁻²s⁻¹이었다. 또한 CO₂와 O₃ 침착속도사이에는 정비례관계가 있었다 (LAI>2.0).

검색어: 대두, 미기상학적방법, 열수지법, 오존, 이산화탄소, 침착속도, 플럭스

서론

식물은 생장에 필요한 CO₂를 잎의 기공을 통하여 대기로부터 흡수한다. 또한 O₃ 및 NO_x 등의 기체상대기오염물질도 CO₂와 동일한 경로를 통하여 식물체내로 확산되어진다. 따라서 식물은 CO₂ 및 기체상대기오염물질의 흡수원으로서 지구온난화방지는 물론 대기정화에도 중요한 역할을 담당하고 있다 (Totsuka 1987, Schimel 1995). 자연상태에 있어서의 식물군락이 가지는 CO₂의 흡수능력 및 대기정화능력을 평가하기 위해서는 微氣象學的方法(micrometeorological method)을 통하여 이들 기체의 플럭스(flux)를 실측할 필요가 있다 (Baldochi *et al.* 1988). 현재 식물군락의 CO₂ 플럭스를 장기적으로 평가하기 위한 Fluxnet가 생태학은 물론 다방면의 연구자들에 의하여 전지구 규모로 연구가 수행되기 시작했으며, 식물군락의 대기정화능력, 즉 식물군락에 의해서 흡수되어지는 대기오염물질의 정량화에 있어서도 연구가 진행되고 있다 (Kim *et al.* 1997, 1998). 따라서, 본 연구는 미기상학적방법의 하나인 熱收支法(Bowen ratio energy balance method)을 이용하여 大豆(*Glycine max*) 개체군에서 CO₂와 O₃ 플럭스를 측정, 식물군락이 가지고 있는 이들 기체들의 흡수능력을 평가해석하는 것이다.

플럭스 측정방법 및 대상식물군락

플럭스 측정이론

식물군락의 상층에 있어서, 군락표면과 수직방향의 플럭스(F , mol m⁻²s⁻¹)는 동일 수직선상에 위치하는 서로 다른 두지점 사이의 輸送係數(D , mol m⁻²s⁻¹)와 기체상 물질의 농도차(ΔC , mol/mol)를 이용하여 구할 수 있다 (式 1).

$$F = D \cdot \Delta C \dots\dots\dots(式 1)$$

여기서 ΔC 는 실측이 가능하며, D 는 다음에 설명되어지는 熱收支法을 이용하여 구할 수 있다.

식물군락에 의하여 흡수되어진 純放射量(net radiation, R_n , W/m²)의 에너지는 顯熱(sensible heat flux, H , W/m²), 潛熱(latent heat flux, λE , W/m²) 및 地中熱流量(soil heat flux, G , W/m²)을 통하여 대기와 지표면으로 에너지가 분배됨으로 式 2와 같은 열수지식으로 나타낼 수 있다. 또한 H 와 λE 는 각각 式 3과 式 4와 같이 나타낼 수 있다.

$$R_n = H + \lambda E + G \dots\dots\dots(式 2)$$

$$H = c_p \cdot \rho_a \cdot D_H \cdot \Delta T \dots\dots\dots(式 3)$$

$$\lambda E = \lambda \cdot \rho_a \cdot D_w \cdot \Delta e \cdot \frac{0.622}{P} \dots\dots\dots(式 4)$$

여기서 ρ_a 는 공기밀도(kg/m³), λ 는 물의 蒸發潛熱(J/kg), P 는 대기압력(Pa), c_p 는 공기의 定壓比熱(1012 J kg⁻¹K⁻¹)이다. 또한 ΔT 와 Δe 는 위에서 설명한 두지점 사이의 온도차(K)와 수증기압차(ρ_a)이다.

식물군락표면에서 수직선상에 위치하는 두지점 사이의 D 는, 군락환경층(canopy boundary layer)내일 경우, 기체상 물질의 종류와 관계없이 동일하다는 것이 알려져있다 (Monteith and Unsworth 1990, Jones 1992). 따라서, 이 두지점 사이의 H 에 대한 수송계수(D_H), λE 에 대한 수송계수(D_w) 및 기체상물질의 수송계수(D_{gas})가 동일하다고 가정하면 式 2, 3, 4로부터 式 5가 유도되어, 두 지점에 있어서의 D 는 R_n , G , ΔT 와 Δe 의 관측을 통하여 측정된다.

$$D = \frac{R_n - G}{\rho_a \cdot \lambda \cdot \frac{0.622}{P} \cdot \Delta e + c_p \cdot \rho_a \cdot \Delta T} \dots\dots\dots(式 5)$$

대상식물군락

식물군락은 大豆(*Glycine max*) 個體群을 대상으로 하였다. 측정기간은 1996년 7월 25일부터 9월 20일로, 58일 동안이었으며, 이 기간 중의 葉면적지수(Leaf area index,

LAI)는 0.5에서 4.0의 범위에서 변화하였다. 미기상학적인 방법을 통한 플럭스의 측정은 日本 東京都府中市에 위치한 東京農工大學의 農學部附屬府中農場(위도: 35°41', 경도: 139°29', 표고: 60 m)에서 실시하였으며, 실험개체군의 면적은 250 m×200 m이었다.

기체농도차 측정

D 및 ΔC 를 측정하기 위해서 두 측정지점간의 거리는 측정개체군의 식물군락표면에서 수직선상에 위치하는 두 측정지점간의 吹走距離(fetch)를 고려하여 2.0 m로 설정하였다. 식물군락표면에서 수직선상에 위치하는 두 측정지점간의 거리가 짧을 경우 ΔC 와 ΔO_3 을 측정하기 위해서는 높은 분해능력을 가지는 기체농도차 측정시스템이 필요하다. 따라서 본 연구에 있어서는 Kim(1998)의 방법을 이용하여 ΔC 와 ΔO_3 을 측정하였다.

측정기기 및 설치방법

미기상학적인 방법을 통한 플럭스의 측정은 군락환경층 내에서 이루어져야 함으로, 측정기기들의 위치는 G_{max} 개체군의 취주거리(fetch)를 고려하여 개체군 표면으로부터 2.3 m 이하에 설치하였다. D 를 측정하기 위한 측정기기의 종류와 설치방법은 다음과 같다.

R_n 은 放射收支計(MF-40, EKO)를 실험개체군의 평균 높이에서 1.0 m 상부에 설치하여 측정하였고, G 는 熱流計(MF-81, EKO)를 지표면으로부터 0.01 m 하부에 3개소 설치하여 측정하였다. 군락표면으로부터 수직선상에 위치하는 두 지점간의 ΔT 와 Δe 는 두 개의 通風乾濕計(Kim 1998)를 이용하여 측정했으며, 상하통풍건습계의 배치는 식물개체군의 평균 높이에서부터 0.3 m 위에 하부통풍건습계를, 하부통풍건습계로부터 2.0 m 위에 상부통풍건습계를 설치하였다. 또한, ΔC 를 측정하기 위한 가스 분석기는 CO_2 의 경우 적외선기체분석계(LI 6262, LI-COR)를 사용하였으며, O_3 의 농도차(ΔO_3)는 자외선흡수형 O_3 분석계(DY 1500, Dylec)를 사용하였다.

해석에 필요한 미기상 관측항목과 측정기기는 다음과 같다. 일사량과 광합성유효방사량(photosynthetically active radiation, PAR)의 측정은 지상 1.5 m에 설치한 精密全天日射計(MS-62, EKO)와 光量子計(LI 190SB, LI-COR)를 사용하였다. 풍속은 風車型風向風速計(KDC-S4, YOUNG)를 지상 4.0 m에 설치하여 측정하였으며, 토양수분량은 tensiometer(Kim 1998)를 사용하여 지하 0.15 m 깊이에 2개소, 지하 0.30 m 깊이에 1개소를 설치하여 측정하였고 토양호흡량은 Murayama 등(1997)의 방법에 의하여 측정하였다.

이와 같은 미기상 및 기체 측정기기는 식물군락의 중앙에 위치한 관측타워 및 格納庫에 설치하였으며, 측정기기로 부터의 출력은 Kim(1998)과 동일한 방법으로 정리하였다. 본 연구에서 해석에 사용된 각 측정치는 일사량이 0 W/m² 이상일 경우의 평균치이다.

결과 및 고찰

환경조건

측정기간중에 있어서의 기상변화에 따른 식물군락의 스트레스는 없었다고 생각되어지며, 토양수분량도 pF 1.1에서 1.9로 식물군락이 건조스트레스를 받지 않는 충분한 토양수분량을 유지했다고 생각된다 (Table 1). 관측기간중의 CO_2 농도의 일변화는 3%정도였으며, O_3 농도는 0 nmol/mol~93 nmol/mol로 큰 일변화 폭을 나타내었고, O_3 농도의 일변화패턴은 Smidt 등(1990)에 의하여 보고된 일변화 패턴(표고 600 m 이하의 O_3 농도변화패턴)과 일치하였다. 전 관측기간 중, 평균 O_3 농도의 변화는 35%로 이 기간중의 평균 CO_2 농도의 변화와 비교하여 큰 변화폭을 나타내었다 (Table 1). Matyssek 등(1992)과 Reiling and Davison (1992)에 의하면 중간차이는 있으나 장기간에 걸쳐서 평균 O_3 농도가 50~100 μ mol/mol일 경우 식물생장에 영향을 미칠 수 있다고 보고한 바 있다. 그러나 본 관측기간내의 O_3 평균농도는 43 μ mol/mol로 O_3 에 의한 식물생장에의 영향은 없었다고 생각된다.

CO_2 플럭스

식물군락의 광합성속도는 미기상학적 방법에 의하여 측정된 CO_2 플럭스와 토양호흡에 의하여 발생된 CO_2 플럭스의 합이며, 식물군락이 흡수한 총 CO_2 의 흡수량이기도 하다. 본 연구에 있어서의 토양 호흡량은 평균 2 μ mol m⁻²s⁻¹으로 실험개체군의 평균 CO_2 플럭스의 약 6%정도이다 (Table 1). 따라서 미기상학적인 관측 오차를 고려하면 실험개체군의 CO_2 플럭스에 영향을 미칠 정도의 양이 아니라고 생각됨으로 본 연구의 CO_2 플럭스 평가에서 고려하지 않기로 하였다.

Table 1. Daytime mean values of micrometeorological and gaseous measurements during the experimental period (25th~82nd days after sowing) over *Glycine max* canopy

Measurements	Average	Standard deviation
Solar radiation (W/m ²)	559	88
Photosynthetically active radiation (μ mol m ⁻² s ⁻¹)	1081	177
Vapor pressure deficit (Pa)	1484	305
Air temperature (°C)	27.6	2.4
Soil moisture availability (pF)	1.5	0.3
Wind speed (m/s)	2.0	0.5
CO_2 concentration (μ mol/mol)	346	10
O_3 concentration (nmol/mol)	43	15
CO_2 flux (μ mol m ⁻² s ⁻¹)	34	14
O_3 flux (nmol m ⁻² s ⁻¹)	20	7
Deposition velocity of CO_2 (mol m ⁻² s ⁻¹)	0.10	0.04
Deposition velocity of O_3 (mol m ⁻² s ⁻¹)	0.46	0.11

G. max 개체군의 CO₂ 플럭스는 LAI가 0.5일 경우 약 20 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 에서 LAI가 4.0일 경우 60 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 까지 증가하였으며, LAI가 커짐에 따라 CO₂ 플럭스가 증가하는 경향을 나타냈다. 파종후 78일 이후의 성장후기에 있어서는 LAI가 2.8임에도 불구하고 CO₂ 플럭스가 20 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 까지 감소하는 결과를 나타냈다 (Fig. 1). *G. max* 개체군을 사용한 Larcher(1995)의 보고에 의하면, 잎의 최대 광합성속도는 엽면적을 기준하여 45 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 였다. 본 연구결과를 단위엽면적당 CO₂ 플럭스로 환산하면, 성장초기의 LAI가 0.5에서 40 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 4.0에서 15 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 그리고 성장후기의 LAI가 2.8일 경우 4 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 이었다. 이와 같이 성장전기에 있어서는 LAI가 낮을 경우가 *G. max*의 최대광합성속도와 가까운 값을 나타내었으며, 성장후기에서는 단위엽면적당 CO₂ 플럭스의 감소를 나타냈다. 따라서, *G. max* 개체군의 성장단계에 따라 식물군락의 엽면적당 광합성속도가 변화하는 것을 알 수가 있었다. 이와 같은 결과로 미루어볼 때, 성장전기에는 LAI가 증가함에 따라 식물군락의 상부엽에서만 PAR의 흡수가 치중되고 군락 하부엽은 군락 상부엽에 의한 PAR의 흡수로 인해 광합성이 제한을 받는 결과라고 추정되며, 성장후기에는 잎의 광합성능력의 저하에 따른 결과라고 생각된다.

Evans(1973)의 *Triticum boeoticum*(LAI=3.2)을 이용한 실험결과에 의하면, 잎의 최대광합성속도는 일사량의 증가에 따른 포화곡선을 나타내었으나, 군락에서 측정된 최대광합성속도는 일사량의 증가에 따라 정비례적으로 증가했다고 보고하였다. 또한 Baldocchi(1994)의 *T. aestivum*(LAI=2.7~3.3)과 *Zea mays*(LAI=1.3~3.0)의 개체군을 이용한 실험 결과에 있어서도 PAR과 CO₂ 플럭스와의 정비례관계가 있다는 것을 알 수가 있다. 본 연구의 *G. max* 개체군의 경우에도 PAR과 CO₂ 플럭스(LAI>2.0)와의 관계는 상기한 두 보고와 일치하는 결과를 나타냈다 (Fig. 2). 이와 같

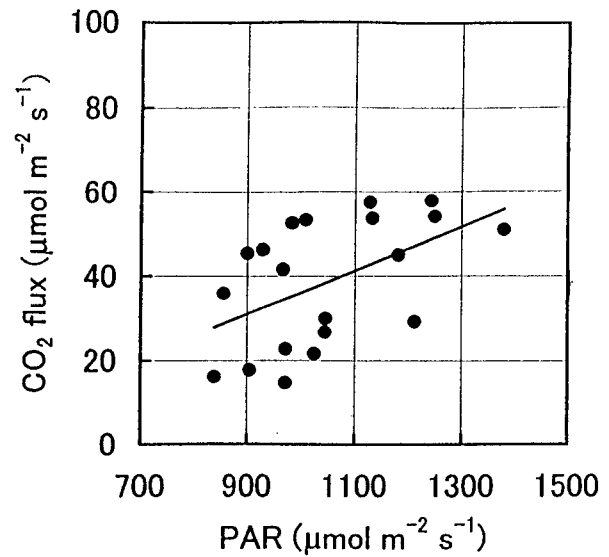


Fig. 2. The relationship between the CO₂ flux and photosynthetically active radiation (PAR) over *Glycine max* canopy (LAI>2).

은 결과들은 PAR의 변화에 따른 광합성 특성이 개엽단위와 군락단위에 있어서 차이가 있다는 사실을 시사하고 있다.

O₃ 플럭스와 침착속도

Fig. 1에서 *G. max* 개체군의 LAI가 0.5일 경우와 2.0일 경우를 비교하여 보면, O₃ 플럭스의 차이는 나타나지 않았으나, CO₂ 플럭스는 증가하는 경향을 나타냈다. 이와 같은 사실은 기공을 통한 O₃의 흡수 뿐만 아니라 토양표면에서의 O₃ 침착도 실험개체군의 O₃ 플럭스에 영향을 미친 결과라고 생각된다. 따라서, LAI가 작을 경우, 식물에 의한 O₃ 흡수를 평가함에 있어 토양표면에서의 O₃ 침착을 충분히 고려할 필요성이 있다고 생각된다. 한편, 파종후 35일경부터 LAI가 증가함에 따라 O₃ 플럭스가 증가하였고 파종후 65일이 경과함에 따라 O₃ 플럭스도 감소하여, CO₂ 플럭스의 변화와 동일한 경향성을 나타내었다. 또한 이 기간중의 개체군내의 평균 O₃ 농도도 0 $\mu\text{mol/mol}$ 이었으므로 토양표면에서의 O₃ 침착효과는 무시되어도 좋을 것으로 생각된다. 따라서, 이 기간중의 O₃ 플럭스를 *G. max* 개체군의 O₃ 흡수량으로 평가하여도 문제가 없을 것으로 생각한다. 본 실험결과를 통하여, O₃ 플럭스는 CO₂ 플럭스와 함께 LAI와 밀접한 관계를 가지고 있다는 것을 알 수가 있으며, 식물이 기공을 통하여 CO₂를 흡수함과 동시에 O₃도 흡수되었다고 생각할 수 있다.

CO₂와는 달리, 대기의 O₃ 농도는 큰 변화를 나타내고 있다 (Table 1). 따라서 식물군락의 O₃ 흡수량을 평가할 경우 O₃의 침착속도(deposition velocity)를 사용할 필요가 있다. O₃ 플럭스를 대기의 O₃ 농도로 際算한 값이 O₃의 침착속도

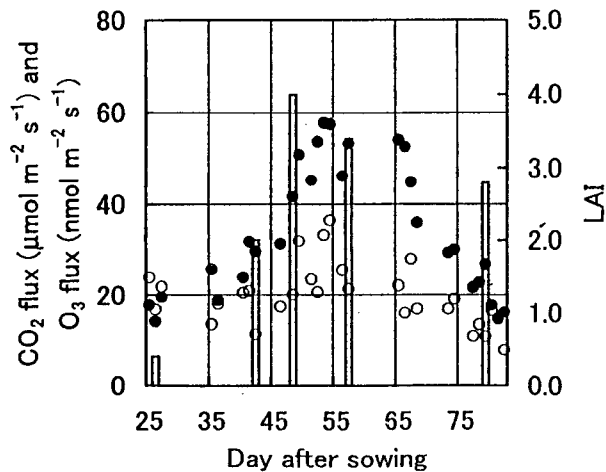


Fig. 1. Time-series of CO₂ flux (●), O₃ flux (○) and leaf area index (LAI, □) during the experimental period (25th~82nd days after sowing) over *Glycine max* canopy.

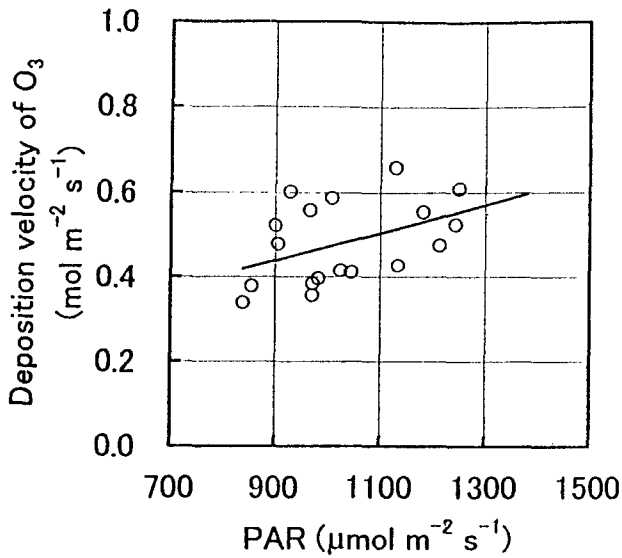


Fig. 3. The relationship between the deposition velocity of O₃ and photosynthetically active radiation (PAR) over *Glycine max* canopy (LAI>2).

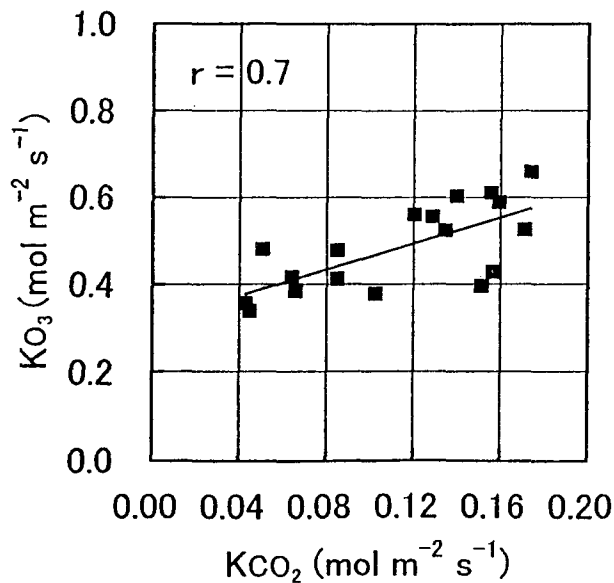


Fig. 4. The relationship between the deposition velocity of O₃ (K_{O₃}) and CO₂ (K_{CO₂}) over *Glycine max* canopy (LAI>2). The r denotes correlation coefficient.

(deposition velocity)이며, 본 연구에 있어서의 변화폭은 0.3~0.7 mol m⁻²s⁻¹이었고 평균치는 0.5 mol m⁻²s⁻¹이었다 (Table 1, Fig. 3). Wesely 등(1978, 1982)은 개체군을 이용한 O₃의 침착속도의 측정결과에서 *Zea mays* 개체군에서는

0.2~1.7 mol m⁻²s⁻¹, *G. max* 개체군에서는 평균 0.5 mol m⁻²s⁻¹이라고 보고했고, *T. aestivum* 개체군을 이용한 Delany 등(1986)의 보고에서는 평균 0.3 mol m⁻²s⁻¹, 초지를 대상으로 한 Grunhage 등(1994)의 보고에서는 0~0.4 mol m⁻²s⁻¹이었다. 이와 같은 결과로부터 식물개체군간에 다소의 차이는 있으나 작물군락의 O₃ 침착속도는 평균 0.5 mol m⁻²s⁻¹인 것으로 추정된다.

LAI가 2.0이상일 경우 *G. max* 개체군의 PAR과 O₃ 침착속도와 관계는 CO₂ 플럭스와 PAR과의 관계와 동일한 정비례관계를 나타내었다 (Fig. 3). 또한 O₃의 침착속도와 CO₂의 침착속도의 관계에 있어서도 정비례관계가 있었으며, *T. aestivum*(LAI=3.7), *Zea mays*(LAI=5.7), *Avena sativa*(LAI=3.8)에서 측정한 Kim 등(1997, 1998)의 보고와 일치하는 결과였다 (Fig. 4). 이와 같은 결과는 식물군락의 LAI가 2.0이상일 경우, CO₂와 동일한 확산경로를 통하여 O₃의 대부분도 식물에 의하여 흡수되어지며, 식물군락의 CO₂ 흡수량으로부터 O₃의 흡수량을 산정할 수 있는 가능성을 시사하고 있다.

인용문헌

Baldocchi, D. 1994. A comparative study of mass and energy exchange rates over a closed C₃ (wheat) and an open C₄ (corn) crop: II. CO₂ exchange and water use efficiency. *Agric. For. Meteorol.* 67: 291-321.

Baldocchi, D.D., B.B. Hicks and T.P. Meyers. 1988. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. *Ecology* 69: 1331-1340.

Delany, A.C., D.R. Fitzjarrald, D.H. Lenschow, R. Pearson, G.J. Wendel and B. Woodruff. 1986. Direct measurements of nitrogen oxides and ozone fluxes over grassland. *J. Atmos. Chem.* 4: 429-444.

Evans, L.T. 1973. The effect of light on plant growth, development and yield. In R.O. Slatyer (ed.), *Plant Response to Climatic Factors*. UNESCO, Paris. pp. 21-35.

Grunhage, L., U. Dammggen, H.D. Haenel and H.J. Jager. 1994. Response of a grassland ecosystem to air pollutants:III. The chemical climate: Vertical flux densities of gaseous species in the atmosphere near the ground. *Environ. Pollut.* 85: 43-49.

Jones, H.G. 1992. *Plants and microclimate*. Cambridge University Press, Cambridge. 428 p.

Kim, W. 1998. Studies on evaluation of atmospheric purification of gaseous air pollutants by vegetation. Ph. D. Thesis. Tokyo Univ. of Agriculture and Technology, Tokyo. 108 p.

Kim, W., M. Aoki, T. Izuta and T. Totsuka. 1997. The deposition velocities of CO₂ and O₃ in wheat field.

- J. Jpn. Soc. Atmos. Environ. 32: 58-63.
- Kim, W., M. Aoki, K. Horie, T. Izuta, T. Totsuka and T. Shioya. 1998. The ratios of deposition velocities of ozone and nitrogen dioxide to carbon dioxide in maize and oat fields. J. Jpn. Soc. Atmos. Environ. 33: 36-41.
- Larcher, W. 1995. Physiological plant ecology. Springer-Verlag, Berlin. 506 p.
- Matyssek, R., M.S. Gunthardt-Goerg, M. Saurer and T. Keller. 1992. Seasonal growth, $\delta^{13}\text{C}$ in leaves and stem, and phloem structure of birch (*Betula pendula*) under low ozone concentrations. Trees 6: 69-76.
- Monteith, J.L. and M. Unsworth. 1990. Principles of environmental physics. Edward Arnold, New York. 291 p.
- Murayama, G, W. Kim, T. Chimura, A. Koyama, K. Horie and M. Aoki. 1997. Long-term measurement of soil respiration rate in *Zea mays* canopy. J. Agr. Met. 54: 82.
- Reiling, K. and A.W. Davison. 1992. The response of native, herbaceous species to ozone: growth and fluorescence screening. New Phytol. 120: 29-37.
- Schimel, D.S. 1995. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. Global Change Biol. 1: 77-91.
- Smidt, S., K. Gabler and H. Puxbaum. 1990. Die zeitliche und vertikale Zunahme der Ozonkonzentrationen. Osterr Forstztg 247. Folge. 7: 58-60.
- Totsuka, T. 1987. The evaluation of absorption capacity of air pollutants by plant communities based on the production of vegetation. Res. Rep. Natl. Inst. Environ. Stud. 108: 19-24.
- Wesely, M.L., J.A. Eastman, D.R. Cook and B.B. Hicks. 1978. Daytime variations of ozone eddy fluxes to maize. Boundary-Layer Meteorol. 15: 361-373.
- Wesely, M.L., J.A. Eastman, D.H. Stedman and E.D. Yalvac. 1982. An eddy-correlation measurement of NO₂ flux to vegetation and comparison to O₃ flux. Atmos. Environ. 16: 815-820.

(1999년 7월 9일 접수)

Flux of Carbon Dioxide and Deposition Velocity of Ozone over *Glycine max* Canopy

Kim, Wonsik and Ho-Joon Lee*

Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Tokyo, 153-8505, Japan
Department of Biological Sciences, Division of Natural Science, Konkuk University,
*Seoul, 143-701, Korea**

ABSTRACT: Carbon dioxide (CO₂) and ozone (O₃) fluxes were measured over *Glycine max* canopy using the bowen ratio energy balance method at Fuchu - 20 km west of Tokyo, in late July and late September 1996. The CO₂ and O₃ fluxes were influenced by variation in leaf area index (LAI) during the measuring period. When LAI was more than 3.0, the CO₂ flux was found to be positively correlated with photosynthetically active radiation (PAR). The O₃ flux was always positive with an average deposition velocity for this case of about 0.5 mol m⁻²s⁻¹. A positive correlation existed between the deposition velocity of O₃ and CO₂ during the period of LAI>2.0.

Key words: Bowen ratio energy balance method, Carbon dioxide, Deposition velocity, Flux, *Glycine max*, Micrometeorological method, Ozone
