

식물의 엽록소형광반응을 이용한 대기오염 평가

대기환경팀

김익수 · 안경수 · 이승천 · 조성호 · 박진아 · 배일상 · 김남진 · 정 권 · 엄석원

Air Pollution Assessment Using Plant Chlorophyll Fluorescence Responses of Plants

Atmospheric Environment Team

**Ik-soo Kim, Kyoung-soo Ahn, Seung-cheon Lee, Seong-ho Jo,
Jin-a Park, Il-sang Bae, Nam-jin Kim, Kwon Jung and Seok-won Eom**

Abstract

This study was carried out to measure the Chlorophyll fluorescence of plants to assess air pollution at 14 sites near air quality monitoring stations from May to August in 2012. The air quality of Namsan monitoring stations, which are representative sites of urban forests, demonstrated similar levels with common urban air quality, while the levels of air pollutants in road side monitoring stations, which are influenced by automobile emissions, were shown to be higher than general air pollutants levels. The regional environmental stresses on plants observed were classified as urban, roadside, and suburban, listed in descending order of plant stress observed. F_m / F_o values of urban, roadside, and suburban areas were 3.513, 4.527, 4.705, and 6.271, respectively. The environmental stress OJIP curve appears to be more severe for trees in roadside areas. Eight plants observed in order of descending photosynthesis yield levels were euonymus, apricot, cherry, zelkova, and ginkgo. Zelkova and ginkgo, which are widely planted trees, showed intermediate levels of photosynthesis yield. NO_2 , CO , PM_{10} , and wind speed were positively correlated with the first fluorescence response(F_o), while temperatures were negatively correlated. The correlation coefficients of the maximum fluorescence(F_m) with TSP, PM_{10} , $PM_{2.5}$ and $PM_{1.0}$ were higher for smaller particulates. Cherry and apricot were found to have values for F_v/m that were higher than 0.8, indicating normal plant physiological activity, while ginkgo and zelkova, with F_v/m values of less than 0.8, were observed as experiencing environmental stress.

Key words : air quality, Chlorophyll fluorescence, plants environmental stress.

서 론

사람이나 동물, 식물은 호흡이나 피부를 통하여 생명이 다할 때까지 대기와 접촉하고 있으며, 그 밖의 물체들도 그 표면과 끊임없이 대기와 상호 작용하고 있다. 대기오염으로 인하여 발생하는 피해나 손상은 사람이나 동물에게 영향이 나타나기 전에 식물에 자주 명백한 증상으로 나타나고 있다. 대기 중의 중요한 오염물질로 이산화황, 불소, 염소, 오존등과 같은 무기물이 있으며 PAN, 에틸렌과 같은 유기물이 있는데 이러한 물질의 농도와 사람, 동물, 식물과 같은 수용체의 민감도나 저항성에 따라서 피해 증상이 다르다. 대기오염으로 인한 피해는 곰팡이, 박테리아, 바이러스, 해충, 영양결핍, 독성물질에 의하여 일어나는 증상과 기온, 풍속, 수분의 해로운 영향과 혼동될 수 있으며 대도시, 용광로, 제련, 전력, 공항, 고속도로, 소각로, 제지산업과 석유산업 등 시설 근처에서 나타난다. 식물에 대한 대기오염의 영향은 얼룩덜룩한 잎, 잎의 가장자리가 타거나 가지가 마르고, 성장이 잘 안되거나 이른 낙엽현상을 보이며, 꽃이 피지 않거나 꽃봉오리가 빨리 떨어지며 생산량이나 질이 떨어지는 문제 등으로 나타나고 있다. 잎에 나타나는 가시적인 피해는 잎 조직의 괴사, 잎 색깔의 변화, 성장의 변화나 조숙에 의한 낙엽 등 현상으로 분류된다. 대기오염이 문제가 되는 지역과 피해정도의 지배하는 요소는 오염물질의 형태와 농도, 오염원과의 거리, 노출시간, 기상상태를 들 수 있다. 이 외의 요소로도 도시크기와 위치, 지형, 토양 및 영양공급, 식물의 성숙도, 식물의 종 다양성등이 있다(1~4).

위와 같이 다양한 환경과 변화에 적응하려는 식물에 의하여 나타나는 현상이나 식물의 조직의 중금속 축적량, 식물세포조직 변화 등의 연구를 통하여 더 큰 환경피해를 예방하고자 하는 다양한 연구가 지속적으로 수행되고 있다(5). 환경이 다른 두 곳의 도시지역에서 식물활성도를 평가하기 위하여 도시대기측정소에서 이끼류를 6주 동안 노출시켜 엽록소형광반응 등의 방법으로 평가하였는데, 모든 측정법에서 두지역간식물활성의 차이가 나타났고(6). 도시지역에서 키가 큰 식물인 *Tradescantia*

*pallida*와 이끼류중 *Usnea amblyoclada*을 이용하여 대기중 부유분진에 따른 생물학적 반응을 평가(7, 8)하는 등 대기오염 평가시 생물을 이용한 모니터링(biomonitoring)기법에 대한 연구도 활발히 진행중이다. 비파괴검사로 생물에 손상을 입히지 않으며 환경스트레스에 따른 식물의 반응을 알 수 있는 엽록소형광분석은 환경오염과 식물스트레스 연구는 이미 많은 선행연구가 외국에서는 진행중이다. 엽록소형광분석은 저온 및 고온스트레스(4, 9), 과도한 빛 에너지(10), 일주기와 계절적 변화, 병원균 감염 등 연구와 식물스트레스 진단과 돌연변이체 선발(4, 11) 분야에서 활용되고 있다. 우리나라에서는 원예분야의 식물스트레스 연구에 제한적으로 이용되고 있으며 환경분야에서는 지금까지 연구성과가 미미한 실정이다.

본 연구에서는 지역적 특성이 있는 대기질이나 오염상태를 해당 지역에 서식하고 있는 식물의 생리활성 반응을 통하여 나타나는 엽록소형광, 유도 및 소멸반응에 의한 스트레스변화 등을 평가하여 대기오염을 진단할 수 있는 방법을 모색함과 아울러 가로수 관리와 공원생태계관리를 위한 기초자료로 제공하고 한다.

연구방법

1. 측정위치

자동차 운행이나 인구수의 차이, 주요도로와의 거리 등을 환경조건을 고려하여 측정지점을 도로변, 도심산림, 공원, 배경지역 등으로 구분하였다. 대기질과 식물과의 상관관계 규명을 위한 식물의 엽록소형광분석 지점은 그림 1과 같이 서울시 대기오염 상시측정망이 설치·운영되는 일반대기 및 도로변 측정소로 선정하였는데, 도로변측정소 2개소, 도심산림 2개소, 도심공원을 포함한 2개 공원, 배경측정지점 2개소, 일반도심 6개소 등 총 14개소에서 5월부터 8월까지 측정하였다.

2. 측정항목

1) 일반대기질 측정 및 형광측정

대기질 측정망에서 상시측정되는 항목은 SO₂,

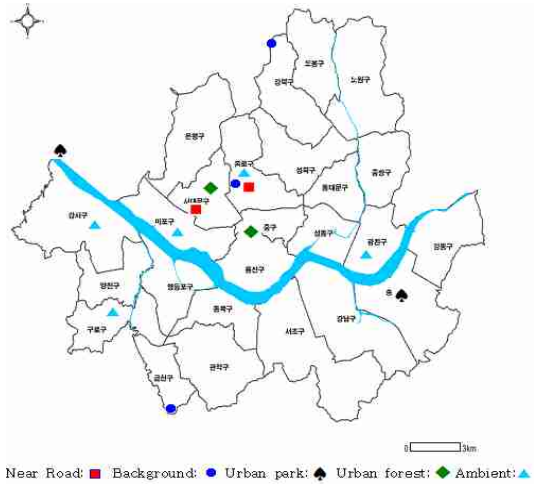


Fig. 1. Chlorophyll Fluorescence measuring sites.

NO, NO₂, NO_x, CO, O₃ 등 가스상 물질과 TSP, PM10, PM2.5, PM1.0 등 입자상물질, 온도, 상대습도, 풍향, 풍속 등 기상인자와 자외선량(UV), 일사량(Solra radiation), 메탄, 비메탄, 총탄화수소 등이며, 대기압과 운량 등은 자료를 이용하였다. 또한, 위 지역에서 가로수나 나무를 선정하여 F₀, F_m, F_v, OJIP, 광합성수율, Kinetic 분석과 대기질을 측정하였다.

2) 엽록소형광반응 측정원리

Multi mode Chlorophyll Fluorometer(Optisciences, OS5P)를 이용한 엽록소 형광분석은 20분정도 암적응된 잎의 초기형광값 F₀, 최대형광값 F_m, 광합성수율 F_v/m, 엽록소형광유도곡선 OJIP, 형광소멸곡선 Kinetic을 측정하였다.

식물은 광합성색소에 의해 흡수한 빛에너지의 대부분을 광합성에 이용하고 나머지 극히 소량의 에너지는 열이나 엽록소형광으로 방출하는데, 스트레스 환경에서는 광합성에 이용되는 빛에너지가 감소하고 엽록소형광이 증가하게 된다.

$$\text{형광} + \text{광화학} + \text{열} = 1 \quad (1)$$

위 식(1)에서 형광과 열을 측정되면 나머지 광화학값이 결정된다(4, 9, 12).

일반적으로 식물이 스트레스를 받을 때 F₀가 증가

하고 F_m는 보통 감소로 나타난다. 이들 두 값은 엽록소의 함량과 잎의 두께나 나이, 환경요인에 따라 값에 차이가 나타나며 이들의 비, 즉 F_m/F₀를 스트레스 지표로 사용한다. 또한, F_m에서 F₀를 뺀 값을 F_v(maximum variablescence)라 하며 F_v을 F_m로 나눈 값인 F_v/F_m은 광화학 반응에 대한 양자수율의 최대치를 의미하며 식물잎이 광합성을 수행할 수 있는 최대 잠재력이다.

엽록소 형광은 수분결핍, 온도, 영양결핍, 오염원, 병원균의 침입과 같은 환경스트레스 연구에 좋은 방법이다. 초기 광화학 반응이 일어남에 따른 형광소멸을 광화학적 형광소멸(photochemical quenching, qP)라 하고, 이런 광화학적 반응이외의 다른 요인에 따라 형광이 감소할 때 이를 비광화학적 형광소멸(non-photochemical quenching, qN)이라 하는데(13, 14), 엽록소 형광분석기는 qP, qN 등 엽록소 소멸에 관한 파라메타 정보를 얻을 수 있는 측정법이다.

결과 및 고찰

1. 대기질 현황

엽록소형광을 측정한 강서, 관악산, 구로, 남산, 마포, 북한산, 서대문, 송파, 종로, 행주지점의 일반대기질과 기상자료는 그림 2~5와 같이 나타났고 신촌 및 종로 4가 도로변대기질은 표1과 같이 나타났다. 일반대기질 측정지점 중 아황산가스는 종로지역에서 0.007 ppm으로 가장 높게 나타났고, 질소산화물은 NO, NO₂, NO_x 성분이 마포지역에서 각각 0.011, 0.036, 0.047 ppm 으로 가장 높게 나타났다.

또한, 입자상 물질중 마포에서 PM₁₀이 79.1 μg/m³로 가장 높게 나타났고, PM_{2.5}는 서대문에서 32.9 μg/m³로 마포에 비하여 높게 나타났다. 도로변 대기질은 엽록소형광을 측정한 신촌사거리와 종로4가 지점에서 5월~8월의 자료로서 일반대기질 항목에 탄소원소 및 통행량 등을 더하여 측정하였다. 그리고 기상요소는 대기질에 물리화학적으로 많은 영향을 미치므로 대기질 해석시 반드시 고려

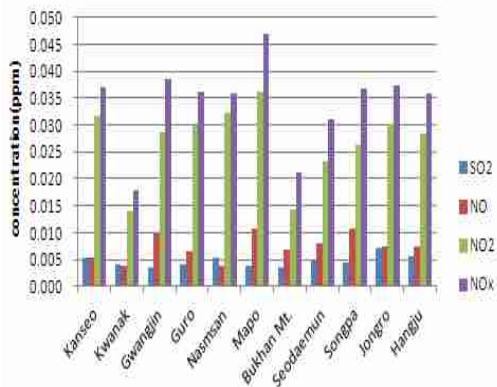


Fig. 2. The concentration of gas phase material in ambient air.

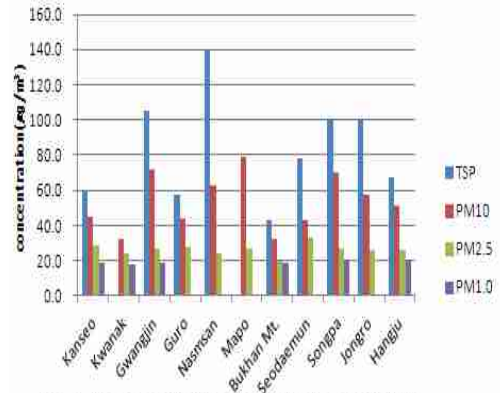


Fig. 3. The concentration of particle phase material in ambient air.

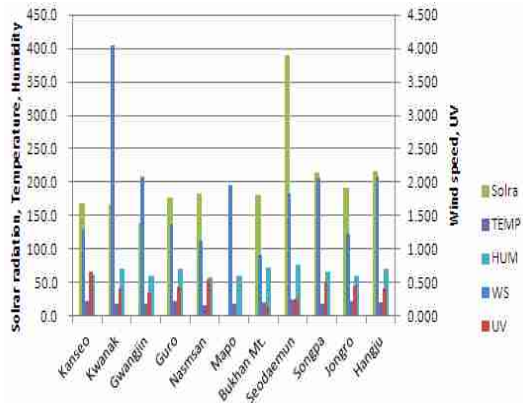


Fig. 4. The meteorological factors at ambient station.

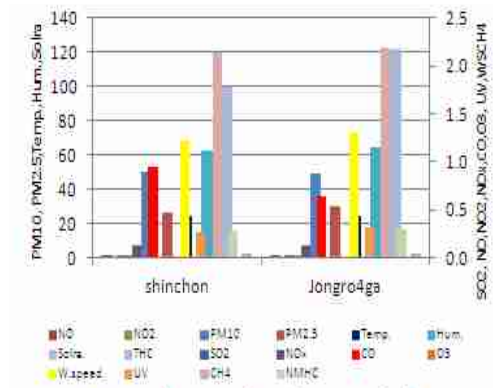


Fig. 5. The air quality of near roadside at Jongro4ga and Shinchon.

하여야 할 요소이기 때문에 대기질측정시 함께 측정하고 있다.

2. 지점별 엽록소 형광측정

대기오염에 의한 환경스트레스가 다를 것으로 예측되는 지점을 표 1과 같이 10개 지역으로 분류하여 F_0 , F_m 값을 측정하였고, 이를 토대로 F_v , F_m/F_0 , $F_{v/m}$ 를 산출하였다. 형광측정 대상 식물과 도로와의 거리 및 주변환경에 따라 분류한 지점에서 초기형광값 F_0 는 공원, 도로변, 일반대기가 높게 나타났고, 산림근처 및 도심에서 벗어난 지점은 도로변이나 도시에 비하여 낮게 나타났다.

이는 도로변과 도심에 식재된 수종은 오염에 강한 수종이거나 환경변화에 적응하여 나타난 것으로

F_0 는 잎에 흡수된 빛이 광합성과 열로 이용되지 못하면 방출되는 값으로 보통 식물이 스트레스를 받으면 F_0 는 증가하지만 식물에 따라 정상적인 값이 달라질 수 있으며, 식물이 스트레스를 받으면 F_m 은 감소하지만 이 또한 식물에 따라 정상적인 값이 달라질 수 있다. 식물의 활동에 저해가 되는 환경요인 변화와 대기오염이 식물에 스트레스를 일으키는 것을 나타내는 지표로 고려될 때 도심지역인 종로, 마포지역과 도로변지역인 신촌사거리에서 F_m/F_0 가 가장 낮게 나타나 이곳의 식물들에게 스트레스가 큰 것으로 나타났다. 또한, 광합성 생산량을 나타내는 $F_{v/m}$ 도 도심지역에서 0.679로 가장 작게 나타나 도심산림의 $F_{v/m}$ 0.840의 약 80%에 해당하는 값으로 나타났다. 이는 도심산림

Table 1. Chlorophyll fluorescence measured at some park, load and forest in Seoul city
(unit : $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{S}^{-1}$)

area	F_o	F_m	F_v	F_m/F_o	F_v/m
Park	292	1534	1243	5.253	.810
near road	279	1263	984	4.527	.775
central park	244	1309	1066	5.365	.811
central forest	266	1295	1029	4.868	.793
near central forest	188	1179	992	6.271	.840
near central road	237	1155	917	4.873	.793
background forest	250	1198	948	4.792	.790
ambient	279	1135	856	4.068	.747
downtown	228	801	573	3.513	.679
near downtown	197	927	730	4.705	.786

의 수종이 도심환경과 접촉하면서 환경에 적응하였거나 다른 지역에 비하여 스트레스가 덜 한 것으로 판단된다. 구로와 광진 지역을 포함한 일반 대기지역은 F_m/F_o , F_v/m 가 각각 4.068, 0.747로 도심지역을 제외한 다른 지역보다 식물이 환경스트레스가 심하고 광합성 생산량이 적은 것으로 나타났다.

도시지역의 도로변, 도심공원, 도심산림 및 공원 등에서 5월~8월 식물의 형광반응에 의한 값 사이의 관계는 그림 6~7과 같이 나타났다. 일반적으로 F_v/m 는 값이 0.8보다 낮으면 광계2의 반응중심

이 손상되었거나 비가역적 불활성상태로 판단하는데(3), 공원과 산림지역을 제외한 도로변, 도심지역은 0.679~0.793으로 수목의 정상적인 생리활동에 방해가 되는 요인이 있는 것으로 나타났다. 이는 F_m/F_o , F_v/m 값이 환경스트레스의 차이가 수종에 따라 다른 값을 나타낼 수 있으나, 표 1과 같이 지역적 차이를 나타내는 것은 식물스트레스 측정법에 의하여 대기오염 진단할 수 있음을 시사한다고 할 수 있다.

그림 6~7의 회귀식에 나타난 바와 같이 F_v 는 암적응된 후 식물의 초기형광 반응값인 F_o 보다는 식

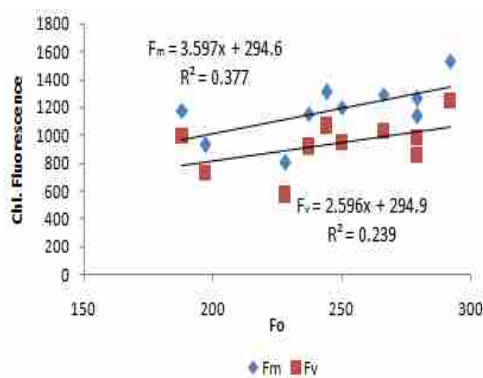


Fig. 6. The regression curve between F_o and F_v (or F_m).

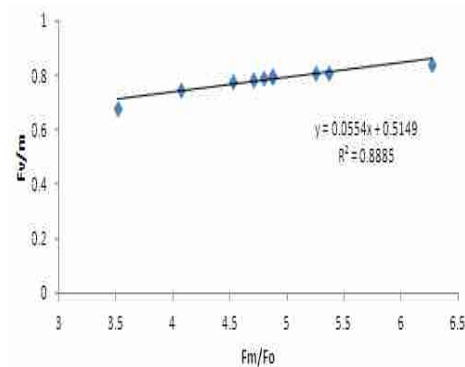


Fig. 7. The regression curve between F_m/F_o and F_v/m .

물의 최대형광값인 F_m 에 따른 영향이 절대적이며, 환경 스트레스 지표로 표현되는 F_m/F_0 는 광합성 효율 F_v/m 과 상관계수값이 $0.942(R^2=0.888)$ 로 나타나 스트레스와 광합성효율은 매우 밀접한 관계로 나타났다.

3. 형광유도에 의한 지역별 환경스트레스 변화

식물체가 빛, 온도, 건조 또는 화학적 스트레스 등에 의해 영향을 받았을 때 O-J-I-P 곡선의 양상은 변하게 된다(15, 16). 먼저 O(50 μ s)와 J(2 ms)로 연결되는 O-J구간은 광계II의 반응 중심에서 추기 전자수용체인 QA의 광화학적 환원을 의미하며, J와 I(60 ms)로 연결되는 J-I구간은 광계II의 반응 중심에서 QA⁻QB⁻의 축적을 의미하는 것으로 광계II의 donor 부분에 의해 조절되며 형광소멸이 관찰된다. 마지막으로 I와 P(300 ms)로 연결되는 I-P구간에서는 광계II의 반응 중심에서 plastoquinone pool(PQ pool)로의 전자전달활성, 즉 QA⁻QB⁻의 축적을 의미하며 형광소멸이 관찰된다(17). 즉 식물체가 건조 또는 화학적 변화, 대기오염물질의 농도증가 등 스트레스가 증가하면 J-I-P 값이 감소하며 이에 따라 광계II의 광합성 효율, F_v/m 값이 감소한다(3). 그림 8~9에서 5월은 OJIP곡선이 지역에 따라 일정한 패턴을 보이고 있는 반면 6월은 다소 복잡한 양상을 보이고 있으나, 5월과 6월 모두 도심과 도로변 대기질의 형광유도곡선인 J-I-P 값이 낮게 나타나고 있어

도심환경이 식물광합성에 나쁜 영향을 주는 스트레스 환경인 것으로 나타났다.

4. 형광소멸반응을 이용한 스트레스 측정

표 3은 엽록소에 흡수된 광에너지의 소멸을 kinetic 프로그램을 이용하여 광진 대기측정소 인근의 후박나무에서 측정한 결과이다. 그림 10(a)은 표 3에 나타난 파라미터를 도표로 나타낸 것이고 (b)~(f)는 남산과 서대문, 안산 등 산림 및 도로환경을 고려한 비슷한 환경을 가진 곳을 비교하기 위하여 10개소에서 측정한 것이다.

엽록소형광의 유도는 2단계로 구분되는데, 첫 번째 단계는 아주 빠르게 증가하는 단계로 100ms 이내에서 ground fluorescence (F_0)에서 maximum fluorescence level(F_m)로 증가하고 다음 단계는 광합성이 시작되면서 서서히 감소하는 단계로 수분 내에 steady state fluorescence (F_s)로 감소한다. 스트레스환경에서는 광합성 색소에 의해 흡수된 빛 에너지가 광합성에 이용되지 못하게 방해받거나 완전히 억제되게 되어 엽록소형광이 높게 존재하고, F_m 에서 F_s 로의 감소가 서서히 일어나거나 또는 일어나지 않게 된다(9).

위 그림 11은 대기오염원에 따른 특성이 있는 지역별로 현장에서 Kinetic test를 실시한 결과이다. Kinetic test는 암적응 후 포화광을 비추어 광계 2의 최대효율을 측정된 후 moderate actinic light($200 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)에서 포화광을 20초 간격

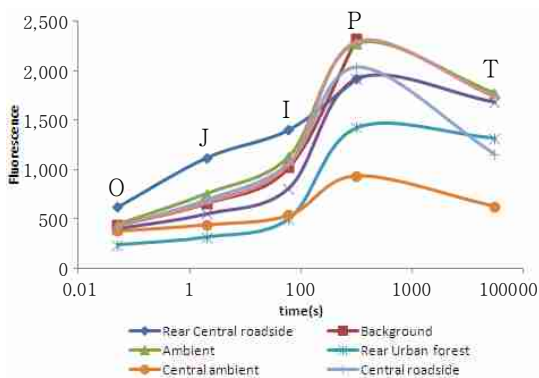


Fig. 8. The regression curve between F_0 and F_v (or F_m).

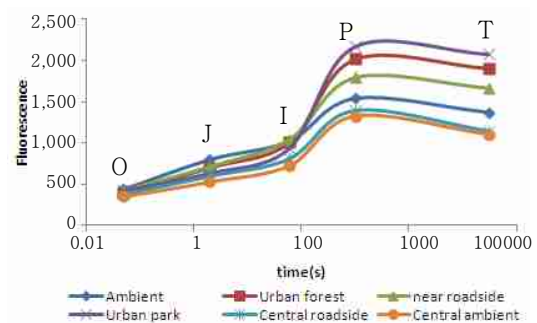


Fig. 9. The regression curve between F_m/F_0 and F_v/m .

으로 비추어 형광변화를 조사한 것이다. 건강하지 않거나 스트레스에 놓여 있는 식물은 건강한 잎에 비하여 빨리 steady state(Ft)에 도달한다(9, 17). 산림지역과 도심지역 등에서 측정된 값으로 각 지역특성별로 소광형태가 다른 것을 알 수 있다.

그림 11은 수중에 따라 Fs, Fms, Yield (Y)를 측정하여 나타낸 결과이다. 측정지역에 따라 환경

요인이 달라질 수 있으나 euonymus의 수율이 매우 높게 나타나 도시대기 중에 동종의 나무를 심으면 오염물질을 제거할 수 있을 것으로 판단된다.

또한, 표 4는 엽록소 형광반응과 대기오염도와 상관분석의 결과이다. 이 표에서 엽록소 형광반응은 측정높이, NO₂, NO_x, CO, TSP, PM₁₀, PM_{2.5}, PM_{1.0}, 풍속, 기온 등과 유의수준 0.01에서 상관성이 있는 것으로 나타났다.

Table 3. Photochemical quenching and non-Photochemical quenching parameter of trees near the Kwangjin monitoring station

Obs	Fs	Fms	Y	qP	qN	NPQ	ETR
1	764	769	0.006	0.015	0.733	1.17	0.3
2	557	585	0.047	0.191	0.882	1.85	2.3
3	474	506	0.063	0.477	0.946	2.3	3.1
4	433	467	0.072	0.992	0.978	2.58	3.6
5	412	446	0.076	0.992	0.995	2.74	3.8
6	395	434	0.089	0.992	0.992	2.85	4.4
7	386	419	0.078	0.992	0.992	2.99	3.9
8	378	416	0.091	0.992	0.992	3.01	4.5
9	372	409	0.09	0.992	0.992	3.08	4.5
10	368	407	0.095	0.992	0.992	3.1	4.7

note) $qP = (Fm' - Ft)/Fm'$, $qN = (Fm - Fm')/(Fm - Fo)$
 $NPQ = (Fm - Fm')/Fm'$, $Fms = Fm - Fs$

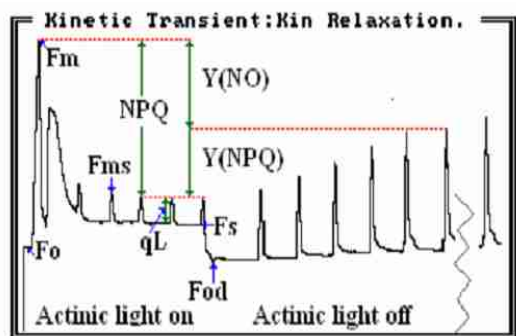
Table 4. The correlation coefficient between fluorescence parameter and air pollution item

Item	height	NO ₂	NO _x	CO	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM _{1.0}	Wind speed	Temp.
Fo	-0.191	.336**	.259*	.459**	.329*	.279**	0.193	0.183	.299**	-.395**
Fm	-.483**	.359**	.317**	.269*	.453**	.464**	.538**	.763**	-0.048	-0.112
Fv	-.484**	.322**	.292**	0.202	.422**	.446**	.534**	.757**	-0.109	-0.045
Fv/m	-.471**	0.132	0.145	-0.033	0.116	.212*	.322**	.556**	-.268*	0.002

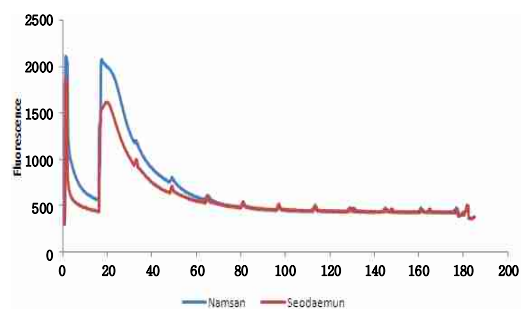
note) significance level: ** : 0.01 * : 0.05

식물의 잎의 높이에 따라 F_o 의 값은 상관성이 나타나지 않았으나 F_m 은 측정높이와 역상관성이 있는 것으로 나타났다. 이것은 지상 위에서 자라는 식물보다 높은 곳에서 자라는 식물이 스트레스 환경에 놓여 있다는 것을 의미하지만, 이것은 서로 다른 수종에서 얻어진 결과로 향후 동일수종에 대한 높이별 반응을 확인할 필요가 있다. 이산화질소는 초기형광값 및 최대형광값과 상관계수값이

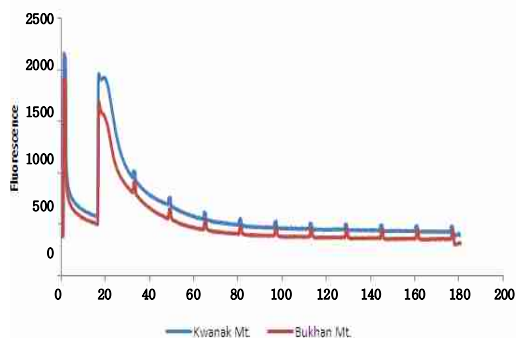
각각 0.336 및 0.359로 나타났으나 광합성 양자수율과는 상관성을 나타내지 않았다. 특히, 먼지의 입자크기가 작아질수록 입자 염색소 형광반응은 상관계수가 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 대기 중 먼지상 입자가 커질수록 식물광합성에 방해가 되는 것으로 큰 먼지입자가 잎에 달라붙어 기공을 폐쇄하거나 잎에 달라붙은 먼지입자가 햇빛을 차단하는 등 광합성에 부정적인 영향을 미치는



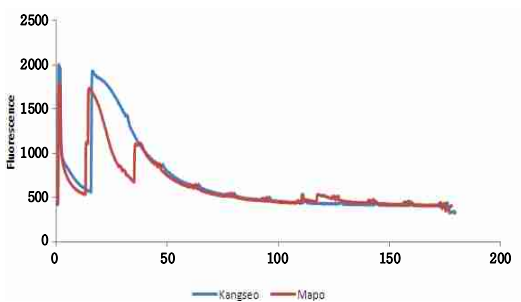
(a)



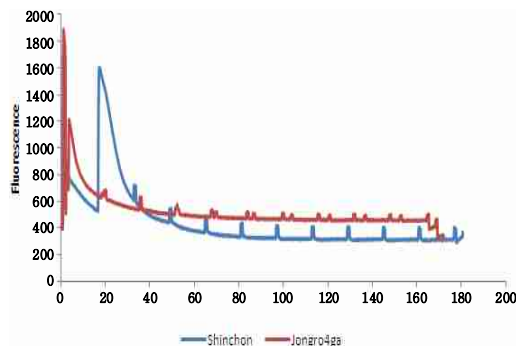
(b)



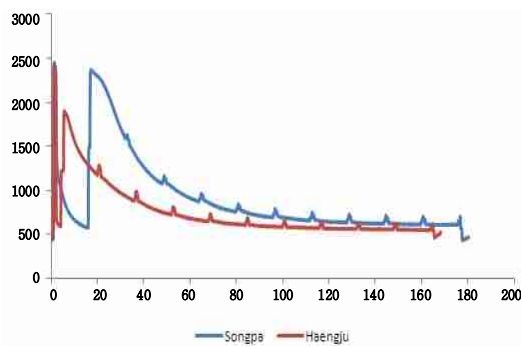
(c)



(d)



(e)



(f)

Fig. 10. The results of kinetic test as the area.

것으로 판단된다. 또한, 기온은 암적응 측정된 F_0 와 상관계수 값이 -0.395 로 음의 상관성을 나타냈다. 기온이 낮을수록 잎에 흡수된 광에너지는 최초광합성에 사용되지 않고 방출되는 양이 많은 것으로 나타나, 기온이 높은 상태에서는 잎에 흡수된 에너지는 초기광합성에 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 또한, 풍속은 초기형광값 F_0 와 양의 상관성이 높은 것으로 나타났으나, 광합성효율에는 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 그리고 자외선량(UV)은 F_0 와 유의수준 0.05 에서 -0.293 의 상관계수값이 나타났으나 F_m , F_v 와는 상관성을 보이지 않았으며, 일사량(Solar radiation)은 F_0 , F_m , F_v 와 상관성을 보이지 않았다. 이는 자외선이 암적응된 잎의 초기광합성에 활용되어 F_0 가 낮은 값을 나타낸 것이며 최대광합성에는 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

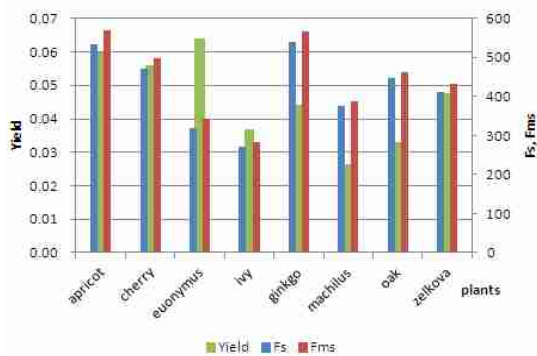


Fig. 11. Yield, F_s and F_{ms} as the plants.

5. 엽록소 형광반응과 대기오염

식물은 대기와 상시 접촉하면서 광합성과 호흡을 통하여 대기 중의 물질을 받아들이고 자체에서 생성한 물질을 대기 중으로 내보내고 있다는 것은 주지의 사실이며, 대기질과의 상호작용을 통하여 그 상태에 따라 사람과 동·식물의 건강에 영향을 미치고 있다(1, 18). 그림 12~14는 대기 중 가스성분, 입자상물질과 식물의 형광반응 파라메타인 F_0 , F_m , F_v 사이의 회귀관계를 나타낸 것이다. 대기중 가스상 물질인 NO_2 와 CO 는 F_0 와 $CNO_2=0.0003X-0.0315(R^2=0.2274)$, $C_{CO}=0.0047x-0.7454(R^2=0.3657)$ 로 그 농도를 나타낼 수 있다. 식물의 형광 및 소

광반응을 이용하여 비파괴 검사로 살아있는 식물을 실시간으로 측정하여 대기질을 나타낼 수 있는 방법은 시료를 채취하여 대기질을 판정하는 기존의 검사와는 분명히 구별되는 것이다.

건강한 식물의 잎은 광합성수율인 $F_{v/m}$ 가 보통 0.8 이상을 나타낸다(4, 9, 19). 만약 이 값이 0.8 보다 낮으면 식물이 스트레스 환경조건에 있다고 할 수 있다. 그림 15에서 뱃나무, 후박나무는 스트레스를 받지 않고 있는 것으로 나타났으며 오염에 강하다고 알려져 있어 가로수로 많이 식재되어 있는 은행나무, 느티나무 등은 담쟁이덩굴, 후박나무, 화살나무보다 스트레스를 많이 받고 있는 것으로 나타났다.

결론

식물의 엽록소 형광반응을 이용한 대기오염을 해석하기 위하여 2011년 5~8월에 대기질 상시모니터링 14개 지점 주변에 있는 8개 수종을 선정하여 엽록소 형광반응을 측정하고 대기질과의 상관성을 연구한 결과는 다음과 같다.

1. 도심산림지역인 남산의 대기질은 일반도시대기질과 비슷한 농도를 나타냈으며 배경지역의 관악산, 북한산은 도심에 비하여 낮은 농도를 나타냈고, 도로변대기질은 자동차의 영향을 받아 일반대기질보다 오염물질의 농도가 높게 나타났다.
2. 식물에 대한 지역별 환경스트레스는 도심 > 도로변 > 도심부근 순으로 F_m/F_0 값이 각각 $3.513 < 4.527 < 4.705$ 순으로 나타났으나 도심공원에서는 6.271 로 가장 높게 나타났다.
3. 실험대상 수종의 엽록소 형광반응은 암적응된 초기형광보다는 최대형광값에 의하여 광합성최대수율이 더 큰 영향을 나타냈다.
4. OJIP 곡선 분석에 의한 환경스트레스는 공원보다 도심과 도로변에 수목에 더 심한 것으로 나타났다.
5. 수종별 광합성최대수율(Yield)는 화살나무 > 살구나무 > 뱃나무 > 느티나무 > 은행나무순으로, 현재 가로수로 많이 식재되어 있는 느티나무,

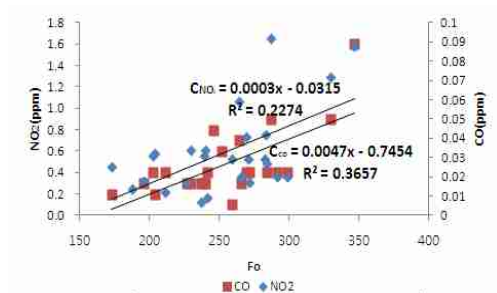


Fig. 12. The regression curve between NO₂, CO and F₀.

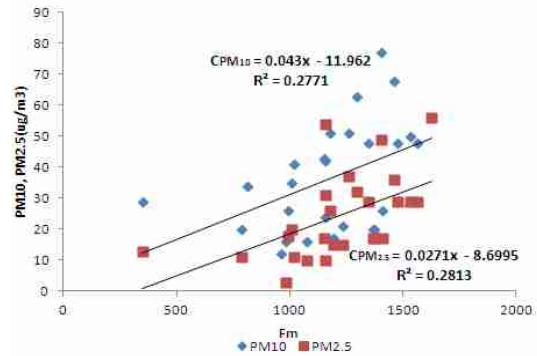


Fig. 13. The regression curve between PM₁₀, PM_{2.5} and F_m.

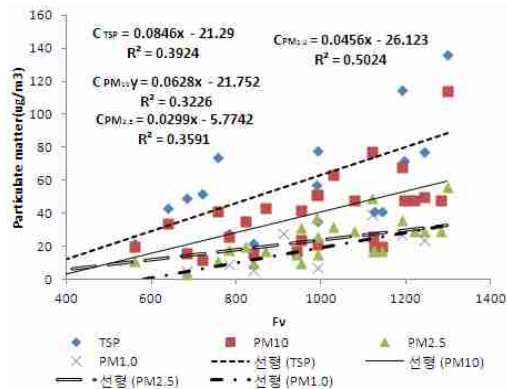


Fig. 14. The regression curves between TSP, PM₁₀, PM_{2.5}, PM_{1.0} and F_v.

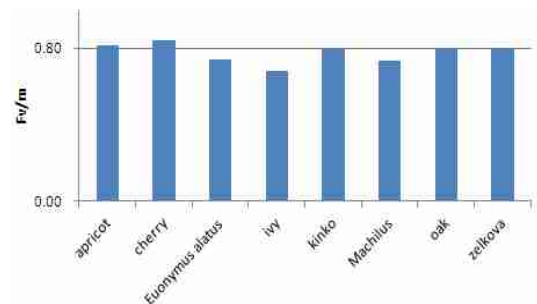


Fig. 15. The comparison of F_{v/m} for tree species.

- 은행나무는 중간수준으로 나타났다.
6. 암적응 후 최초형광반응(F₀)에 영향을 주는 물질로 NO₂, CO, PM₁₀ 및 풍속은 양의 상관성, 온도는 음의 상관성을 보였다. 최대형광반응(F_m)에 입자상물질은 입자의 TSP에서 PM_{1.0}으로 크기가 작아질수록 상관성이 높게 나타났다.
 7. 대기중 가스상 물질인 NO₂와 CO는 $C_{NO_2} = 0.0003F_0 - 0.0315 (R^2 = 0.2274)$, $CCO = 0.0047F_0 - 0.7454 (R^2 = 0.3657)$ 로, $CPM_{10} = 0.043F_m - 11.962 (R^2 = 0.2771)$, $CPM_{2.5} = 0.027F_m - 8.6995 (R^2 = 0.2813)$ 의 회귀식으로 나타났다.
 8. F_{v/m}이 0.8이상인 수종은 벚나무, 살구나무로 정상적인 식물생리활동을 하고 있으나 가로수로 주로 식재되어 있는 은행나무, 느티나무는 F_{v/m}이 0.8이하로 나타나 환경스트레스를 받고 있는 것으로 나타났다.

이상과 같은 논의 결과, 엽록소 형광분석은 식물병리연구를 통한 생태계 진단 및 대기오염 고농도 지역 식물생리활성연구 분야와 대기오염 또는 실내의 공기오염 스트레스를 극복하며 광합성수율이 높은 적절한 수종의 선택, 식물에 대한 고온 및 저온 등 열 스트레스 측정 등 다양한 분야에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Edward J : Air pollution Damage to plants. Alabama cooperative extention system. ANR-913, 2004.
2. Maleva MG, Nekrasova GF and Bezel VS : The response of hydrophytes to

- environmental pollution with heavy Metals, Russian J. Ecol., 35(4):230~235, 2004.
3. Tretiach M, Adamo P, Bargagli R, Baruffo L, Carletti L, Crisafulli P, Giordano S, Modenesi P, Orlando S and Pittao E : Lichen and moss bags as monitoring devices in urban areas. Part I: Influence of exposure on sample vitality. Environmental Pollution. 146: 380~391, 2007.
 4. 오순자, 진국립, 고석찬 : 카드뮴스트레스에 대한 수생식물 5종의 엽록소형광 반응. 한국 환경과학회지, 18(12):1361~1368. 2009.
 5. Lang M, Lichtenthaler HK, Sowinska M, Heisel F and Miehl JA : Fluorescence imaging of water and temperature stress in plant leaves, J. Plant Physiol., 148: 613~621, 1996.
 6. Gilmore AM and Govindjee : How higher plants respond to excess light : Energy dissipation in photosystem II, In: Singhal G. S., Renger G., Irrgang K. D., Govindjee(ed.), Concepts in photobiology: Photosynthesis and Photo-morphogenesis, New Delhi, India, p513~548, 1999.
 7. 형광이미지 분석기술을 이용한 스트레스 진단과 돌연변이체 선발
 8. 정병철, 이춘환 : Applications of fluorescence imaging in the detection of stresses and mutants screening in plants.
 9. 정병철, 이춘환 : 엽록소 형광을 이용한 광합성 연구. Bioware, 2(12), 2000.
http://bric.postech.ac.kr/webzine/content/review/plantbio/dec/lee12_index.html.
 10. Govindjee, Ames J and Fork DC : Light emission by plants and bacteria. Academic Press. Orlando, 1986.
 11. Owens TG : Processing of excitation energy by antenna pigments. In Baker, NR.(ed.) Photosynthesis and the environment. Kluwer Academic Press. The Netherlands. p1~23, 1996.
 12. David JN : The effects of urban trees on air quality. USDA Forest Services, Syracuse, NY, 1996.
 13. Moyer D. Thomas, MA, D.Sc. : Effects of air pollution on plants.
 14. Karaoz MO : Air pollution effects on forest trees in balikesir, turkey. Water, Air and Soil pollution : Focus 3:269~ 279, 2003.
 15. Ya G and Jinglu T : Modeling and simulation of initial phases of chlorophyll fluorescence from Photosystem II. Biosystems 103:152~157, 2011.
 16. Tretiach M : Lichen and moss bags as monitoring devices in urban areas, Part I : Influence of exposure on sample vitality. Environmental pollution 146: 380~391, 2007.
 17. Ilsson HE : Remote sensing and image analysis in plant pathology, Ann. Rev. Phytopathol., 33:489~527, 1995.
 18. Stefan S and Friedl H : Evaluation of air pollution-related risks for Austrian mountains forests. Environmental pollution 130:99~112, 2004.
 19. Validation of photosynthetic-fluorescence parameters as biomarkers for isotopuron toxic effect on alga Scenedesmus obliquus. Environmental pollution, 151:93~100.
 20. Guidi L, Cagno RDi and Soldatini GF : Screening of bean cultivars for their response to ozone as evaluated by visible symptoms and leaf chlorophyll fluorescence. Environmental pollution 151:93~100, 2000.