

옥상녹화용 초본식물의 순간 CO₂ 흡수 및 증발산량 분석¹

안근영^{2*} · 한승원³ · 이은희⁴

The Analysis of Instantaneous CO₂ Uptake and Evapotranspiration of Herbaceous Plants for Artificial Roof Greening¹

Geun-Young Ahn^{2*}, Seung-Won Han³, Eun-Heui Lee⁴

요 약

본 연구는 저토심 옥상녹화에 적용 가능한 초본류 및 지피식물을 중심으로 식물의 광합성작용을 통한 CO₂ 흡수량과 증발산량을 정량화하여 도시미기후 관점에서의 옥상녹화식물의 환경성능을 평가하고자 하였다. 이를 위해 옥상녹화용 초본류 7종을 대상으로 적외선 CO₂ 가스 분석기에 의한 CO₂ 교환 속도 분석을 통해 각 식물의 CO₂ 흡수량과 증발산량을 측정하였다. 실험기간은 생장이 활발해지기 시작하는 5월부터 11월까지 매월 2반복 측정하였고, 주변 환경에 예민한 초본류의 특성상, 환경변수가 고정된 실내에서 광도의 변화를 주어 실시하였다. CO₂ 흡수량과 증발산량을 산출한 결과 단위엽면적당 CO₂ 흡수량은 초본류 중 구절초가 21.47×10⁻⁶g/cm²/s, 매발톱꽃이 12.74 g×10⁻⁶g/cm²/s로 높은 흡수율을 보였고, 켄터키블루그래스도 16.20×10⁻⁶g/cm²/s로 비교적 높았다. 단위엽면적당 증발산량은 켄터키블루그래스가 8.75×10⁻⁵g/cm²/s로 가장 많았고, 다음은 매발톱꽃 8.66×10⁻⁵g/cm²/s, 구절초 8.58×10⁻⁵g/cm²/s 순으로 나타났다.

주요어: 인공지반녹화, 미기후 효과, 탄소저감, 도시열섬현상

ABSTRACT

The purpose of this study is to demonstrate the positive effects of artificial ground greening on the reduction of carbon dioxide (CO₂) which can help improve ecological functions in cities and mitigation of climate change, through quantifying CO₂ uptake and evapotranspiration by the process of photosynthesis of some plants. Experiment of CO₂ uptake and evapotranspiration was conducted by measurement of CO₂ exchange rate using the infrared gas analyzer, for 7 month, growing season from May to November 2009, 2 times a month. The result was as follows; The CO₂ uptake quantity per cm² of *Chrysanthemum zawadskii* was the highest rate at 21.47×10⁻⁶g/cm²/s and *Poa pratensis* was 16.20 g×10⁻⁶g/cm²/s. The stronger was light of intensity, the higher were CO₂ uptake rate of most plants. In quantity of evapotranspiration, *Poa pratensis* was the highest rate at 8.75×10⁻⁵g/cm²/s and *Aquilegia buergariana* was 8.66×10⁻⁵g/cm²/s. From this study, it is confirmed that artificial ground greening has capacity of absorption CO₂ and effects on improving urban microclimate.

KEY WORDS: GREEN ROOF, URBAN MICRO-CLIMATE, CO₂ REDUCTION, HEAT ISLAND EFFECTS

1 접수 2010년 10월 21일, 수정(1차: 2011년 2월 17일, 2차: 2011년 2월 23일), 게재확정 2011년 2월 24일

Received 21 October 2010; Revised(1st: 17 February 2011, 2nd: 23 February 2011); Accepted 24 February 2011

2 서울여자대학교 자연과학대학 College of Natural Science, Seoul Women's University, Seoul(139-774), Korea(gyahn@swu.ac.kr)

3 농촌진흥청 국립원예특작과학원 National Institute of Horticultural & Herbal Science, Suwon(440-706), Korea

4 서울여자대학교 환경생명과학부 Division of Environmental & Life Science, Seoul Women's University, Seoul(139-774), Korea

* 교신저자 Corresponding author(gyahn@swu.ac.kr)

서론

최근 이산화탄소, 메탄, 아산화질소 등 온실효과를 나타내는 가스에 의한 지구온난화현상이 심각한 환경문제로 대두되면서 온실가스 배출을 저감하고 기후변화에 대해 적극적으로 대응하고자 세계 각국이 동참하고 있다(Lee and Choi, 2009). 국내에서도 다양한 방면에서 탄소저감에 관한 노력을 기울이고 있으며 탄소 마일리지제도 등의 관련 정책 뿐만 아니라 에너지절약, 신재생에너지, 자원저감, 탄소 집적, 탄소 흡수 등의 기술적인 면에서 지원방안을 마련하고 있다(Ministry of Knowledge Economy, 2002).

도시 내 수목, 초본 및 토양으로 이루어지는 도시녹지는 증발산 역할과 인공구조물에 도달하는 태양복사를 차단하거나 흡수시키는 기능을 통해 대기온도를 낮추어 주는 역할을 할 뿐만 아니라 온실효과의 주요원인인 CO₂를 흡수함으로써 대기 탄소농도를 저감할 수 있다(Korea Environment Institute, 2007). 대기 중 CO₂ 농도 저감을 위한 노력으로 최근 도시녹지의 효과를 검토하는 연구들이 다양한 방면으로 이루어지고 있다. 또한 대도시를 중심으로 도시녹지 보전에 역점을 두고 도시녹화사업을 적극적으로 전개하고 있으나 서울과 같은 대도시의 경우 도심에 공원녹지의 확충을 위한 토지확보가 거의 불가능하고 대부분 공원녹지 면적의 75% 이상이 도심지 외곽에 편중되어 생활권 주변의 공원녹지 확보는 요원한 과제가 되고 있다. 옥상녹화 사업은 근접녹지와 공원녹지의 확보를 위한 토지보상비와 같은 추가적 비용이 발생하지 않는 입체적 토지활용의 전형적인 수단으로 경제적이며 현실적인 녹화방안으로 각광받고 있다(Yang, 2004; Seoul metropolitan, 2007). 실제로 서울시를 비롯한 전국 각 지자체에서 옥상녹화 지원사업을 진행해 오고 있으며, 최근 친환경인증제도 도입 등으로 옥상녹화에 대한 수요가 급증하자 점차적으로 지원 사업비 및 지원 대상을 확대하고 있다(Seoul metropolitan, 2007).

대기 CO₂ 농도를 저감하기 위한 도시녹지의 효과에 관한 연구는 주로 수목의 탄소 고정량을 산정하고 그에 근거하여 도시수목의 대기 탄소농도의 감소효과를 검토하거나, 대기 탄소농도 저감을 위한 녹지계획 및 관리전략의 제시에 관한

연구들이 있다. 국내에서는 Jo *et al.*(1995)이 탄소 고정과 대기 중 CO₂ 농도의 감소에 작용하는 도시녹지의 기능을 평가한 바 있으며, 도시 내 가로수의 CO₂연간 흡수에 관해 연구하였다(Jo and Cho, 1998). 이외에도 실내공간의 쾌적한 공기 환경개선을 위해 주로 열대 관엽식물을 대상으로 CO₂를 비롯한 각종 유해가스의 농도저감 능력에 대한 실험 연구가 진행되었다(Kim, 2004; Lee, 2004). 그러나 도시 녹지공간의 현실적인 대안으로 떠오르고 있는 옥상녹화용 식물에 대한 CO₂ 흡수 및 증발산량에 관한 연구는 미미하고 특히 기존건축물에 적용 가능한 저토심 옥상녹화용 초본류에 대한 CO₂ 흡수량 및 증발산량의 효과를 정량화한 연구는 전무하다고 볼 수 있다.

이러한 관점에서 본 연구의 목적은 옥상녹화에 적용되는 초본류 위주 식물들의 CO₂ 흡수량 및 증발산량 측정을 통하여 탄소저감 및 미기후 개선에 대한 초본식물의 환경성능을 수치화하고 최종적으로 이러한 옥상녹화식물의 환경성능 정량화를 토대로 향후 탄소저감시대에 대응하여 지속가능한 인공지반녹화의 설계 시 기초 데이터로 활용될 수 있도록 기여하는 것이다.

재료 및 방법

1. 연구범위 및 내용

옥상녹화식물의 CO₂ 흡수량과 증발산량을 정량화하는 것을 목표로 하는 본 연구는 다음과 같이 진행하였다(Table 1). 첫 번째로 기 조성된 옥상녹화 현장 80개소를 조사하여 옥상녹화에 가장 많이 적용되는 초본식물 7종을 선발하였다. 선발된 초본 7종에 대하여 주, 야간 광도변화와 비슷한 조건으로 조도의 변화를 주면서 적외선 가스 분석기를 이용하여 CO₂ 흡수량과 증발산량을 측정하는 실험을 진행하였다. 식물의 생육상태 또는 외부 환경 인자에 의해 CO₂ 흡수 및 증발산량이 수시로 변화되는 초본이라는 특성상, 실험은 외부환경의 변화가 적은 실내에서 수행하여 실험데이터 산출에 오차를 줄이고자 하였다. 마지막으로 실험 결과치를 환산하여 단위면적당 각 식물의 CO₂ 흡수량 및 증발산량을

Table 1. Contents of this study

| Sub topic | Scope | Details |
|-----------------------------|---------------|--|
| Selecting experiment plants | | · Investigation of popular herbaceous plants in Green roof · Reviewing of 80 green roof site |
| Experiment | Leaf of plant | · Measurement of CO ₂ uptake quantity · Measurement of evapotranspiration |
| Conversion into area | Planting area | · Converted to unit area of CO ₂ Uptake and evapotranspiration · Quantification of CO ₂ uptake and evapotranspiration by 7 plants |

산출하였다.

2. 연구방법

1) 식물소재 선발

실험에 적용할 식물초종의 선정은 기존 옥상녹화에서 가장 많이 적용되는 식물 중에서 선발하기 위해, 2002년 이후 진행되어 오고 있는 서울시 지원 사업에 의한 옥상녹화지를 중심으로 2009까지 기조성된 옥상녹화지 총 80개소의 설계도면을 분석, 식재식물을 조사하였다. 조사결과 초본식물 중에서는 벌개미취, 구절초, 비비추, 잔디, 두메부추, 기린초, 매발톱꽃 순으로 식재빈도수가 높게 조사되었다. 가장 많은 빈도수를 보인 상위 10위 안에서 다음 7종의 식물을 선정하였다. 초화류로는 구절초(*Chrysanthemum zawadskii*), 매발톱꽃(*Aquilegia buergeriana* var. *oxysepala*), 벌개미취(*Aster koraiensis*), 비비추(*Hosta longipes*), 아주가(*Ajuga multiflora*), 기린초(*Sedum kamatschaticum*), 잔디로는 한지형 잔디 중에서 고온 건조한 기후에서도 비교적 생육이 양호한 켄터키블루그래스(*Poa pratensis*)를 선정하여 실험을 실시하였다.

2) 엽면적 측정 및 착엽수 조사

본 실험에 사용된 모든 식물은 가능한 발생할 수 있는 생육상의 오차를 줄이기 위해 경기도에 위치한 재배농원에서 일반적으로 공급되는 4치 포트 크기의 초본 중 엽면적이 유사하고 생육상태가 양호한 것으로 선발하였다. 이는 계절별로는 약간의 오차가 있으나 대부분 조정 식재 공사 시 현장에 공급되어 식재되는 일반적인 크기 및 형태를 가진 식물이다.

단위 엽면적 당 CO₂ 흡수량과 증발산량을 식물개체별 총량으로 전환하기 위하여 실험 측정 후 평균 크기의 잎들을 채취하였고, 스캐너를 이용하여 스캔한 뒤 Auto CAD상으로 정확한 식물체별 평균 엽면적을 산출하였다. 식물의

유통단위를 기준으로 차후 실질적 녹화면적 대입을 위해 4치 포트를 기준으로 1개 pot 평균 엽수를 조사하여 총엽면적을 산출하고, 초장, 초폭을 측정하여 개체별 평균부피를 산출하였다(Table 2).

3) CO₂ 흡수량 및 증발산량 측정

(1) CO₂ 흡수량 및 증발산량 측정 실험

CO₂ 흡수량 및 증발산량 측정 실험은 미국 LI-COR사에서 제작한 LI-COR, LI-6400에 의한 광합성능의 측정을 통해 계량화하였다. 본 연구의 실험대상인 초본은 생체량이 작고 상대적으로 대사율이 크기 때문에 환경인자에 의한 측정편차가 수목에 비해 심하다고 할 수 있다. 초본식물의 정확한 광합성능 및 CO₂흡수량, 증발산량의 측정을 위해 발생 가능한 외부환경 변수를 줄이고자, 매일 측정시마다 동일 장소, 동일 시간대에 측정하였다. 측정 시기는 식물의 새순이 성장하여 식물의 잎이 가장 클 시기인 2009년 5월에 시작하였고 가을에 낙엽이 지기 전인 11월까지 반복적으로 월 2회 3반복 측정하였다. 실험 식물은 수분부족에 의한 영향이 없도록 측정 2일 전에 물을 충분히 공급하고 주로 광합성이 활발히 일어나는 오전 8시에서 오후 1시 사이에 측정을 수행하였고, 암반응상태에서의 흡수양상을 보기 위해 야간에 보온 측정하였다. 시료는 측정당시 각 초종의 평균적인 엽령에 해당되고 측정시간대에 평균적인 광량을 받고 있다고 판단된 것을 대상으로 잎을 절취하지 않은 자연 상태에서 측정하였다. 본 실험에서의 CO₂ 흡수량 및 증발산량은 완전히 밀폐된 공간 안에서 CO₂를 주입하였을 때 각 식물의 잎이 순간적으로 흡수한 양과 순간적으로 방출한 H₂O를 측정하는 것이다. 따라서 주간, 야간을 통틀어 식물의 탄소동화작용으로 인한 CO₂ 흡수량과 호흡으로 인한 CO₂ 방출량을 고려한 순흡수량과는 개념적 차이가 있다. 다만 암반응 조건에서의 식물의 CO₂ 흡수양상을 측정함으로써 야간에 일어나는 호흡 및 CO₂방출량을 고려하였다.

Table 2. Average Volume and Growth Condition of plants

| Scientific name | Volume | | | Leaf area | | | Standards of specification |
|--------------------------------|------------|------------|--------------------------------|--|---------------------------------------|---|----------------------------|
| | Height(cm) | Width(cm) | Cubic volume(cm ³) | Average of leaf area(cm ²) | Average of entire leaf per individual | Total leaf area per individual (cm ²) | |
| <i>Chrysanthemum zawadskii</i> | 10.4±1.673 | 15.0±1.581 | 1766.6 | 3.77 | 21.1 | 79.17 | |
| <i>Aquilegia buergeriana</i> | 9.3±1.396 | 14.4±0.547 | 1384.3 | 16.53 | 18.6 | 307.46 | |
| <i>Aster koraiensis</i> | 10.6±1.516 | 14.0±0.707 | 1692.1 | 20.29 | 15.6 | 316.52 | 12cm pot |
| <i>Hosta longipes</i> | 8.8±0.836 | 13.0±1.140 | 1231.5 | 20.41 | 15.5 | 316.35 | |
| <i>Ajuga multiflora</i> | 8.4±0.961 | 17.5±1.341 | 1413.9 | 18.87 | 28.0 | 528.36 | |
| <i>Sedum kamtschaticum</i> | 11.6±2.073 | 14.6±1.140 | 2119.1 | 5.37 | 22.3 | 119.75 | |
| <i>Poa pratensis</i> | 11.0±1.923 | 10*10 | 1200.0 | 2.11 | 598.2 | 1266.02 | 10×10cm ² |

Table 3. Specification of Experiment

| Specification of experiment | |
|--|--|
| CO ₂ density (CO ₂ Mixer 6400-01) | 400 μ mol·mol ⁻¹ |
| Light intensity (LED light source 6400-02B) | 0, 500, 1000, 2000, 3000, 4000 μ mol·m ⁻² /s |
| Temperature of leaf | 25°C |
| Velocity | 500 μ mol/sec |

식물별로 CO₂흡수량 및 증발산량 측정 시 광도는 0, 500, 1000, 2000, 3000, 4000 μ mol·m⁻²/s로 변수를 주었고, CO₂ 주입량은 평소 대기상태의 농도와 유사한 400 μ mol·mol⁻¹ 조건이었으며 유속은 500 μ mol/s로 고정하여 측정하였다 (Table 3).

(2) 단위면적당 CO₂흡수량 및 증발산량

광도는 광원으로부터 식물의 엽면적으로 조사되는 조도로 환산하여 각각 0, 15,000, 35,000, 72,000, 100,000, 150,000 lux로 표현하였다. 150,000 lux의 조도는 여름 맑은 날 직사광선이 내리쬐는 야외 옥상표면에서 측정되는 조도이고, 직사광선 아래 보통 지면 위가 100,000 lux 정도, 15,000 lux는 약간 흐린 날의 조도라 할 수 있다(Paul Schlyter, 2003).

CO₂흡수량과 증발산량의 측정치와 식물별 총 엽면적을 곱하여 각 개체별 CO₂흡수량과 증발산량으로 환산하였다. LI-6400에서 처음 측정된 CO₂값 및 증발산량은 6mm² 규격의 소형 챔버에서 측정된 μ mol·mol⁻¹값과 μ g값으로 표시된다. 초기 부피개념의 측정치를 질량단위인 g으로 환산하기 위하여 다음 식을 이용, 단위 엽면적당 흡수량을 산출하였다.

$$X_2 = X_1 \mu \text{ mol/mol} \times 10^{-6} \times 100/6/\text{CO}_2\text{당량}$$

$$Y = X_2 \cdot X_3$$

X₁: 측정된 CO₂흡수량(μ mol·mol⁻¹),

X₂: CO₂흡수량의 g 환산치(g/cm²/s),

X₃: 식물개체당 총엽면적(cm²/pot),

Y: 한 개체 당 CO₂흡수 총량(g/pot/s)

식물별로 개체 당 CO₂흡수량과 증발산량의 도출결과는 실제 녹화면적에의 적용을 위해 각각의 일반적인 식재밀도 기준에 맞추어 m²당 흡수량과 증발산량으로 환산하였다. 환산 시 CO₂흡수량과 증발산량 적용기준치는 측정치 중 맑은 한낮 옥상표면의 조도와 유사한 15만 lux에서의 측정치를 사용하였다.

결과 및 고찰

1. 조도에 따른 CO₂흡수반응

구절초는 무광 조건인 0 lux에서는 0.307 $\times 10^{-6}$ g/cm²/s의 양을 흡수하다가 조도가 높아짐에 따라 차차 증가하는 양상을 보였다. 옥상에서 한낮에 내리쬐는 광도와 유사한 조건인 15만 lux에서 cm²당 21.47 $\times 10^{-6}$ g을 흡수하여 실험 식물 중 가장 높은 흡수량을 나타냈다(Figure 1).

매발톱꽃의 CO₂흡수량은 무광에서 0.119 $\times 10^{-6}$ g/cm²/s였으며, 15,000 lux 조건에서 조금 증가하여 0.329 $\times 10^{-6}$ g/cm²/s의 흡수량을 보였다. 조도 증가에 따라 흡수량이 차차 증가하여 15만 lux에서 cm²당 12.74 $\times 10^{-6}$ g을 흡수하였다. 별개미취의 CO₂흡수량은 무광조건에서 0.323 $\times 10^{-6}$ g/cm²/s이었지만 조도가 15,000 lux 조건이 되자 10배가량 증가한 4.364 $\times 10^{-6}$ g/cm²/s의 흡수량을 보이며, 점점 증가하는 양상을 나타냈다. 옥상 한낮 시간의 조도인 15만 lux에서는 cm²당 7.480 $\times 10^{-6}$ g을 흡수하였다. 다른 식물이 암반응에서도 미량의 CO₂흡수를 유지했던 것과는 달리 비비추는 무광조건에서 CO₂를 흡수하지 않고 평균 -3.704 $\times 10^{-6}$ g/cm²/s로 마이너스 수치를 나타냈다. 조도가 15,000 lux로 높아지자 CO₂흡수량이 급격히 증가했다가 35,000 lux 조건에서 다시 1.795 $\times 10^{-6}$ g/cm²/s의 흡수량을 나타내 다시 낮아지는 현상을 보였다. 그 이후 조도 증가에 따라 차차 증가하여 15만 lux에서 5.973 $\times 10^{-6}$ g/cm²/s의 양을 흡수하는 것으로 나타났다. 비비추는 무광조건에서 호흡에 의한 방출에 의해 CO₂흡수량이 크게 떨어지는 것으로 나타났으며, 큰 표준편차에서 알 수 있듯 흡수상태와 방출상태를 불안정적으로 반복하는 양상을 보였다. 아주가는 0 lux 조건에서 0.092 $\times 10^{-6}$ g/cm²/s로 흡수량이 저조했지만 15,000 lux에서 3.168 $\times 10^{-6}$ g/cm²/s의 흡수량을 보이며 증가하여 72,000 lux조건에서 6.489 $\times 10^{-6}$ g/cm²/s로 다른 조도 조건에서보다 많은 양을 흡수하였다. 그 이후 차차 흡수량이 줄어들어 15만 lux에서는 4.732 $\times 10^{-6}$ g/cm²/s의 흡수량을 보였다. 기린초의 CO₂흡수량은 무광조건에서 0.953 $\times 10^{-6}$ g/cm²/s이었으나 15,000 lux 조건에서 1.678 $\times 10^{-6}$ g/cm²/s로 증가했고, 15만 lux에서 2.538 $\times 10^{-6}$ g/cm²/s의 흡수량을 나타냈다.

켄터키블루그래스의 CO₂흡수량은 0 lux 조건에서 4.610 $\times 10^{-6}$ g/cm²/s였으며 조도 증가에 따라 차차 증가하는 양상을 보이며, 15만 lux에서 cm²당 16.20 $\times 10^{-6}$ g을 흡수하였다. 측정치로서는 구절초 다음으로 많은 흡수량을 나타냈다.

전체적으로 중간 조도인 72,000 lux에서 가장 많은 흡수량을 보인 아주가를 제외하고는 실험식물의 대부분이 조도가 증가함에 따라 흡수량도 정비례하여 증가하는 양상을 보였다. 또한 암반응 조건에서 마이너스 수치를 보인 비비

1) 조도는 표면의 단위면적에 비추는 빛의 양 또는 광속이다. 이는 기호 E로 표시되며 그 단위는 룩스(lux)이다. 1 lux는 평방미터당 1 lumen(lm/m²)이다.

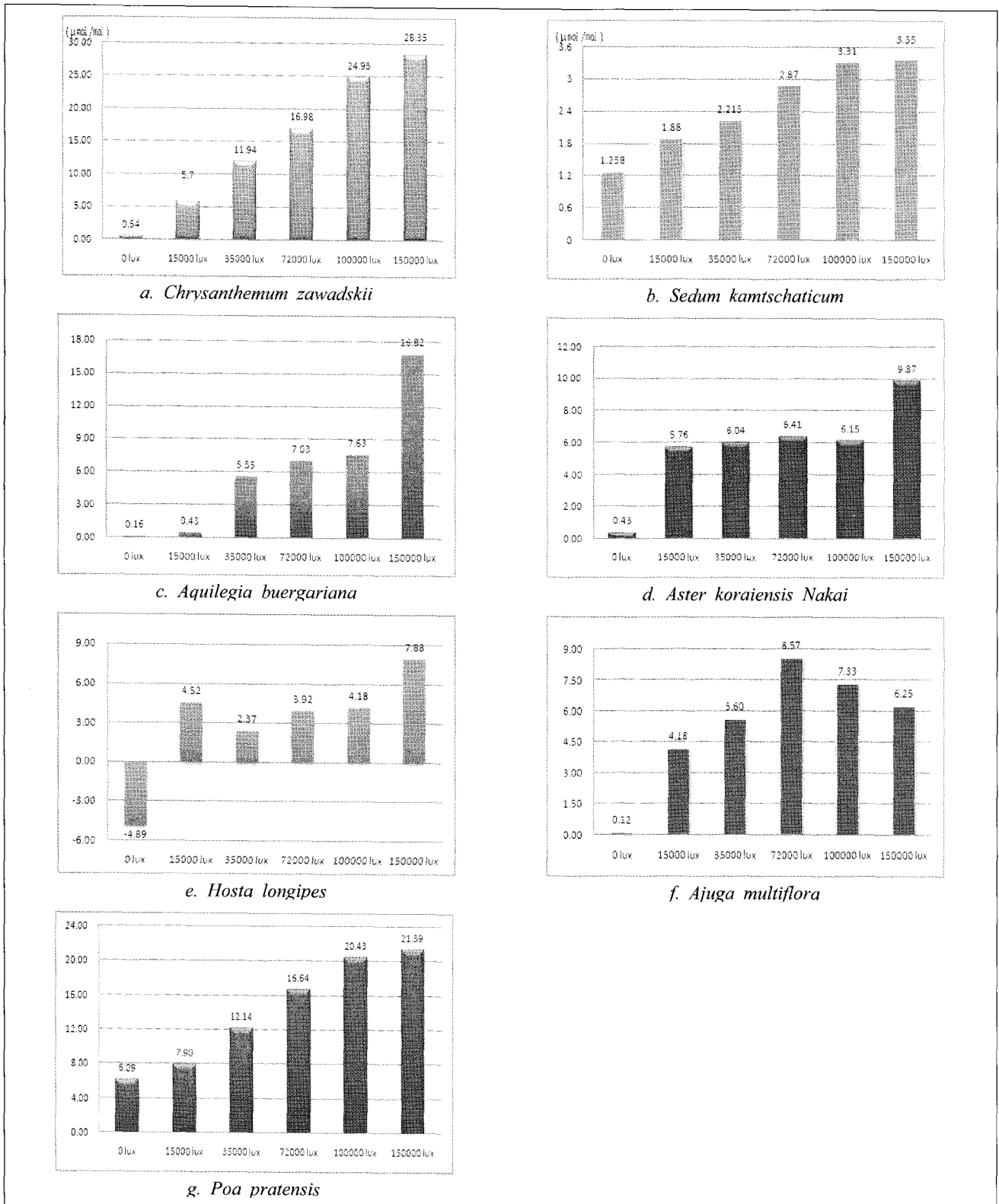


Figure 1. CO₂ Uptake quantity change by value of illumination

Table 4. CO₂ uptake quantity per 1cm² of each plant by value of illuminance

| Value of illumination(lux) | Uptake quantity(g/cm ² /s) | Value of illumination(lux) | Uptake quantity(g/cm ² /s) |
|--|--|---|---|
| a. <i>Chrysanthemum zawadskii</i> | | b. <i>Sedum kamschaticum</i> | |
| 0 | 0.307×10 ⁻⁶ ± 0.563×10 ⁻⁶ | 0 | 0.953×10 ⁻⁶ ± 0.126×10 ⁻⁶ |
| 35,000 | 9.047×10 ⁻⁶ ± 0.881×10 ⁻⁶ | 35,000 | 1.678×10 ⁻⁶ ± 0.693×10 ⁻⁶ |
| 72,000 | 12.861×10 ⁻⁶ ± 1.632×10 ⁻⁶ | 72,000 | 2.174×10 ⁻⁶ ± 0.708×10 ⁻⁶ |
| 100,000 | 18.883×10 ⁻⁶ ± 0.476×10 ⁻⁶ | 100,000 | 2.508×10 ⁻⁶ ± 0.614×10 ⁻⁶ |
| 150,000 | 21.470×10 ⁻⁶ ± 0.202×10 ⁻⁶ | 150,000 | 2.538×10 ⁻⁶ ± 0.512×10 ⁻⁶ |
| c. <i>Aquilegia buergeriana</i> | | d. <i>Aster koraiensis</i> Nakai | |
| 0 | 0.119×10 ⁻⁶ ± 1.123×10 ⁻⁶ | 0 | 0.323×10 ⁻⁶ ± 0.078×10 ⁻⁶ |
| 15,000 | 0.329×10 ⁻⁶ ± 1.030×10 ⁻⁶ | 15,000 | 4.363×10 ⁻⁶ ± 1.279×10 ⁻⁶ |
| 35,000 | 4.204×10 ⁻⁶ ± 0.439×10 ⁻⁶ | 35,000 | 4.570×10 ⁻⁶ ± 1.327×10 ⁻⁶ |
| 72,000 | 5.320×10 ⁻⁶ ± 0.573×10 ⁻⁶ | 72,000 | 4.853×10 ⁻⁶ ± 1.435×10 ⁻⁶ |
| 100,000 | 5.778×10 ⁻⁶ ± 1.305×10 ⁻⁶ | 100,000 | 4.661×10 ⁻⁶ ± 0.963×10 ⁻⁶ |
| 150,000 | 12.740×10 ⁻⁶ ± 3.021×10 ⁻⁶ | 150,000 | 7.480×10 ⁻⁶ ± 0.318×10 ⁻⁶ |
| e. <i>Hosta longipes</i> | | f. <i>Ajuga multiflora</i> | |
| 0 | -3.704×10 ⁻⁶ ± 2.768×10 ⁻⁶ | 0 | 0.092×10 ⁻⁶ ± 0.327×10 ⁻⁶ |
| 15,000 | 3.424×10 ⁻⁶ ± 2.119×10 ⁻⁶ | 15,000 | 3.168×10 ⁻⁶ ± 0.847×10 ⁻⁶ |
| 35,000 | 1.795×10 ⁻⁶ ± 0.294×10 ⁻⁶ | 35,000 | 4.240×10 ⁻⁶ ± 0.807×10 ⁻⁶ |
| 72,000 | 2.969×10 ⁻⁶ ± 0.787×10 ⁻⁶ | 72,000 | 6.489×10 ⁻⁶ ± 0.743×10 ⁻⁶ |
| 100,000 | 3.167×10 ⁻⁶ ± 0.599×10 ⁻⁶ | 100,000 | 5.552×10 ⁻⁶ ± 1.038×10 ⁻⁶ |
| 150,000 | 5.973×10 ⁻⁶ ± 2.384×10 ⁻⁶ | 150,000 | 4.732×10 ⁻⁶ ± 1.098×10 ⁻⁶ |
| g. <i>Poa pratensis</i> | | | |
| 0 | 4.610×10 ⁻⁶ ± 0.037×10 ⁻⁶ | | |
| 15,000 | 5.988×10 ⁻⁶ ± 0.658×10 ⁻⁶ | | |
| 35,000 | 9.198×10 ⁻⁶ ± 1.278×10 ⁻⁶ | | |
| 72,000 | 12.60×10 ⁻⁶ ± 0.455×10 ⁻⁶ | | |
| 100,000 | 15.47×10 ⁻⁶ ± 0.802×10 ⁻⁶ | | |
| 150,000 | 16.20×10 ⁻⁶ ± 1.045×10 ⁻⁶ | | |

추를 제외하고는 대부분이 낮은 광도에서도 미미하게나마 CO₂흡수하는 양상을 나타냈고, 조도가 차차 높아질수록 CO₂흡수반응이 활발해졌다(Figure 2).

아주가는 다른 식물과 달리 전일광인 15만 lux에서보다 상대적으로 낮은 조도인 72,000 lux에서 흡수량이 많았다. 이 결과는 아주가가 전일광보다 차광처리에 의해 엽록소함

량이 증가되고, 피복도도 증가하여 비교적 내음성이 강하며 일반적인 재배적지로서 반그늘 또는 그 이하의 광선을 받는 장소가 적당하다는 사실을 보고한 Shin(1988)의 연구와 유사한 결과로서 음지식물인 아주가의 특성을 보여주는 결과로 판단된다.

비비추의 경우, 암반응에서는 CO₂흡수량이 마이너스 수치로 CO₂흡수보다는 호흡작용이 활발한 것으로 나타났다. 또한 조도증가에 따라 흡수량이 증가하긴 했지만 다른 식물에 비해 15만 lux에서의 흡수량은 상대적으로 저조한 편이었다. 이는 아주가와 마찬가지로 비비추가 자연광보다 차광처리에 의해 엽록소함량과 생육상태가 더 양호해지는 음지식물의 특성을 보고한 연구결과(Kim and Lee, 2009)와 같은 맥락으로 이해할 수 있다. 그럼에도 불구하고 최근 저관리 옥상녹화의 식재초종으로 많이 적용되고 있다는 것은 비비추가 실제 옥상녹화에서 현장 적용한 결과 주기적인 최소한의 영양관리만 주어진다면 별도의 관수관리나 낮은 토심에서도 생육이 양호함이 밝혀졌기 때문이다(Choe et al., 2003).

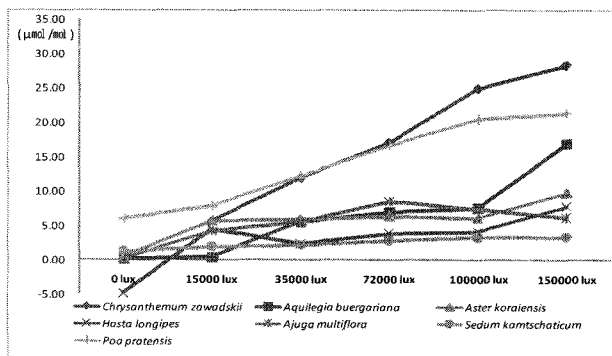


Figure 2. Comparison of CO₂ uptake quantity change

한편 기린초의 경우도 광도가 높아질수록 CO₂ 흡수량도 점차 증가했지만 매발톱꽃이나 별개미취에 비해 15만 lux에서의 CO₂ 흡수량은 낮은 편이었다. 기린초는 암반응에서 다른 식물보다 상대적으로 CO₂의 흡수량이 많았는데, 이는 돌나물과를 포함하는 다육식물이 CAM식물²⁾로 분류되어 독특한 기작으로 CO₂를 흡수, 동화하는 현상과 연관이 있다고 할 수 있다(Lee, 2004). CAM식물은 주간에는 기공을 폐쇄함으로써 CO₂의 이동이 거의 없고 야간에는 기공을 열어 CO₂를 흡수함으로써 주간의 수분소실을 최소화하며, 건조하고 더운 주간에 기공을 닫고, 저장해 놓은 에너지를 분해하여 광합성에 이용하는 구조를 지니고 있다(Drennan and Nobel, 2000). 본 연구에서 실험한 기린초의 경우도 돌나물과에 속하는 세덤류로 높은 광도에서 CO₂ 흡수량이 많아지는 다른 식물에 비해 CO₂ 흡수량이 적었던 이유는 이러한 영향인 것으로 판단된다. 또한 켄터키블루그래스의 경우에도 암반응조건에서 다른 식물에 비해 비교적 높은 CO₂ 흡수량을 보였다.

종합해보면 실험식물 7종 중 구절초와 별개미취, 매발톱꽃은 광도에 따라 비례하여 15만 lux에서 가장 높은 흡수율을 보였다. 초본류 중 가장 많은 흡수량의 측정치를 보인 식물은 구절초로 15만 lux에서 21.47g×10⁻⁶/cm²/s였으며 그 다음으로 켄터키블루그래스 16.20g×10⁻⁶/cm²/s, 매발톱꽃 12.74g×10⁻⁶/cm²/s, 별개미취 7.480g×10⁻⁶/cm²/s, 비비추 5.973g×10⁻⁶/cm²/s, 아주가 4.732g×10⁻⁶/cm²/s, 기린초 2.538g×10⁻⁶/cm²/s 순으로 나타났다.

2. 조도에 따른 증발산 반응

구절초는 0 lux 조건에서 4.817×10⁻⁵g/cm²/s의 증발산량을 나타냈으나 이후 15,000 lux, 35,000 lux 조건에서 감소추세를 보였다. 72,000 lux 조건에서 차차 활발한 증발산량을 보이며 증가하여 15만 lux에서 cm²당 8.581×10⁻⁵g의 증발산량을 나타냈다. 매발톱꽃의 증발산량은 마찬가지로 조도조건이 높아짐에 따라 차차 증가하여 최고 cm² 당 8.662×10⁻⁵g/cm²/s의 증발산량을 나타냈다. 별개미취의 증발산량은 0 lux 조건에서 1.383×10⁻⁵g/cm²/s 이었고 15000 lux 조건에서

1.487×10⁻⁵g/cm²/s로 증가하였다. 그 후 조도 증가에 따라 증발산량도 차차 증가하여 평상시 낮 시간의 옥상표면의 조도인 15만 lux에서 cm²당 2.778×10⁻⁵g의 증발산량을 보였다. 비비추의 경우는 72,000 lux 까지 조도가 증가함에 따라 꾸준히 증가하여 3.233×10⁻⁵g/cm²/s의 증발산량을 보였다가 최고조도 조건인 15만 lux에서는 약간 감소하는 경향을 보였다.

아주는 조도증가에 따라 증발산량이 많아지는 다른 식물과 달리 암반응 조건인 0 lux에서 2.247×10⁻⁵g/cm²/s의 증발산량을 보였고 조도가 15,000 lux조건일 때 1.682×10⁻⁵g/cm²/s로 떨어져 증발산량이 저조해지는 경향을 보였다. 72,000 lux조건에서 3.230×10⁻⁵g/cm²/s로 가장 많은 증발산량을 나타냈고, 15만 lux에서 2.656×10⁻⁵g/cm²/s의 증발산량을 보였다.

기린초의 증발산량은 무광조건에서 1.96×10⁻⁵g/cm²/s의 증발산량을 보이다가 조도 증가에 따라 차츰 증가하여 15만 lux 조건에서 3.04×10⁻⁵g/cm²/s의 증발산량을 나타냈다. 켄터키블루그래스의 증발산량은 마찬가지로 조도가 증가함에 따라 차차 증가하여 15만 lux조건에서 cm² 당 8.75×10⁻⁵g의 증발산량을 보여, 측정식물 중 가장 많은 증발산량을 나타냈다.

증발산량을 측정 결과를 종합해보면, 아주가와 비비추를 제외한 대부분의 식물이 낮은 광도에서는 증발산량이 낮았고, 광도가 차차 높아질수록 증산활동이 활발해지는 것으로 나타났다. 별개미취와 기린초, 켄터키블루그래스는 광도에 따라 비례하여 증가하였고 다른 조도조건에서보다 15만 lux조건에서 각각 가장 높은 증발산량을 보였다. 구절초는 암반응 조건에서 광도가 주어지면 증발산량이 다소 감소하였다가 차차 증가하여 15만 lux에서는 증산활동이 암반응 조건에 비해 활발해졌다. 15만 lux 조건에서 켄터키블루그래스와 매발톱꽃, 구절초는 실험식물 중 가장 증발산량이 많은 식물로 드러났다(Figure 3, 4).

특히 켄터키블루그래스는 암반응조건에서도 증발산량이 3.316×10⁻⁵g/cm²/s였고 15만 lux 조건에서는 8.750×10⁻⁵g/cm²/s의 양을 발산했다. 이러한 수치는 잔디가 15만 lux조건에서 가장 많은 CO₂ 흡수율을 보였던 현상과 같이 이해할 수 있다. 켄터키블루그래스의 경우, 잔디 중 특히 요구수량이 많은 품종으로 적절한 환경이 주어지면 광합성과 함께 증산작용이 매우 활발하여 여름철 하루 동안 1m² 당 20ℓ 정도의 수분을 발산해내는 것으로 알려져 있다(Kim, 2005). 초본류의 경우 아주가와 비비추를 제외하고 0 lux 조건에서의 증발산량에 비해 15만 lux 조건에서 증발산작용이 더욱 활발해지는 것으로 나타났다(Table 5). 이와 같은 결과는 CO₂ 흡수량 측정 시험결과와 유사한데, 아주가와 비비추는 광보상점이 다른 식물에 비하여 낮은 식물(Shin, 1988; Kim and Lee, 2009)로 고풍도 조건보다는 차광조건에서 CO₂ 흡

2) CAM 식물은 Crassulacean acid metabolism으로, CAM 식물(-植物)은 밤에 이산화탄소(CO₂)를 받아들여 말산형태로 저장했다가 낮에 말산을 탈탄산반응으로 탄산이온을 얻어 당을 합성하는 광합성 형태를 가진 식물을 의미한다. 건조한 기후에 적응한 식물을 건생식물(xerophyte)이라 하는데 건조한 시기에 잎을 떨어뜨려내는 종류가 있는 반면 선인장으로 대표되는 다육식물처럼 줄기나 잎에 수분을 저장하는 종류도 있다. CAM식물은 건생식물 중 후자에 속하는 것으로 수분소실을 막기 위해 큐티클층이 두껍고 다육질(多肉質)이면서 표면적이 작은 잎을 가지고 있다.

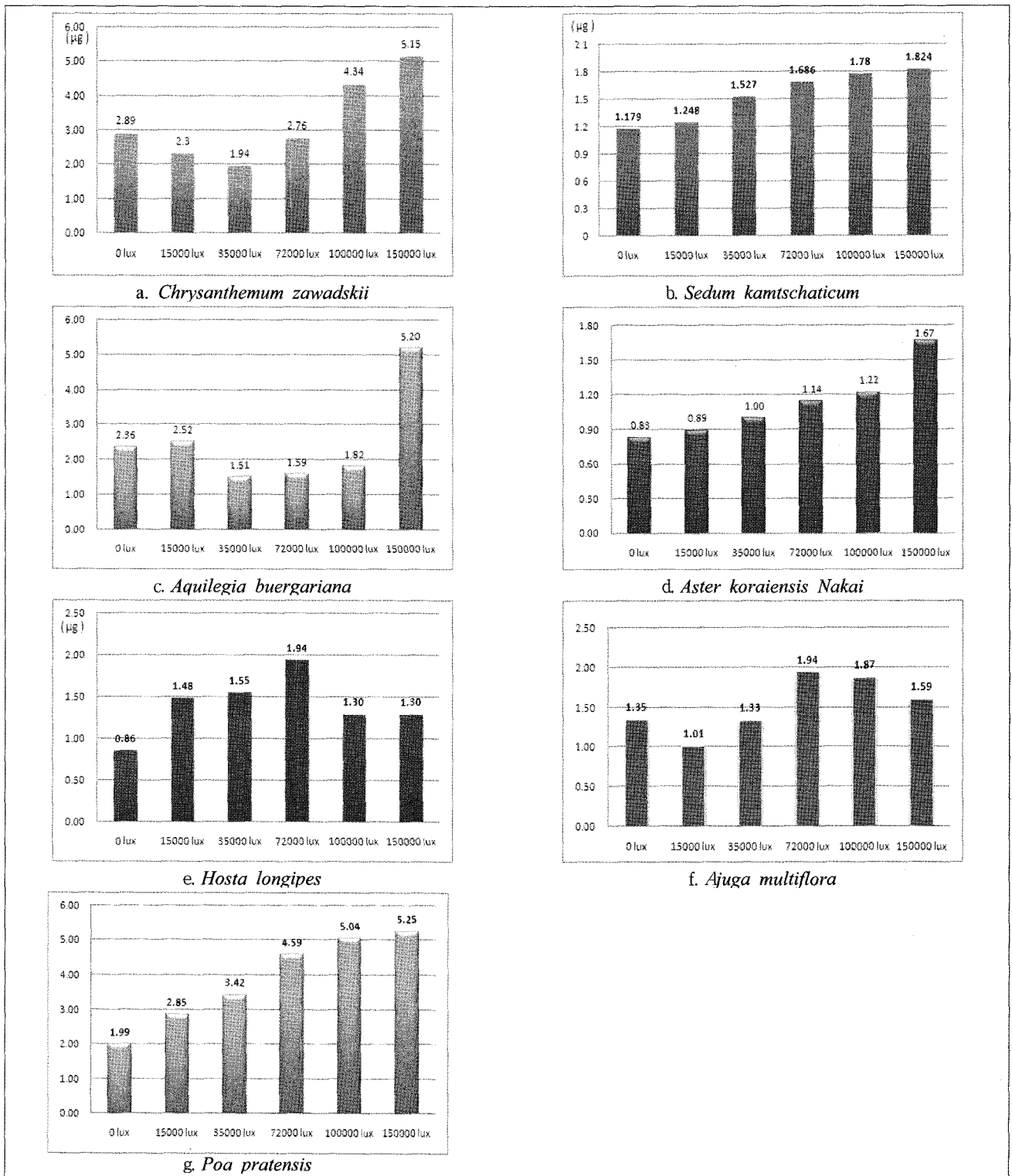


Figure 3. Evapotranspiration quantity change by value of illumination

수율이 양호하게 나타나 광합성과 직결되는 증발산량 또한 추이가 비슷한 것으로 판단된다. 종합해 볼 때 한낮 옥상

표면 조도인 15만 lux 조건에서 증발산량이 가장 높게 나타난 식물은 켄터키블루그래스로 $8.750 \times 10^{-5} \text{g/cm}^2/\text{s}$ 의 증발산

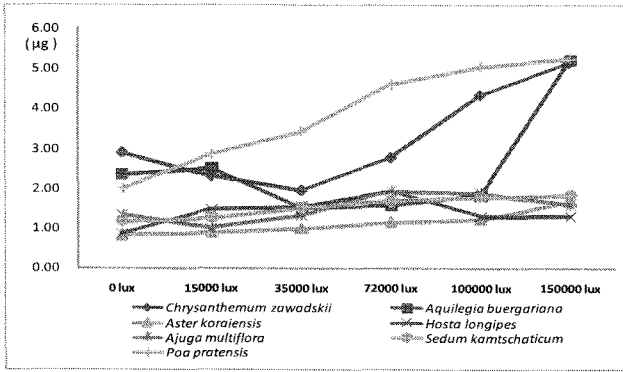


Figure 4. Comparison of evapotranspiration quantity change

량을 보였고 그 다음으로 매발톱꽃 $8.662 \times 10^{-5} \text{g/cm}^2/\text{s}$, 구절초 $8.581 \times 10^{-5} \text{g/cm}^2/\text{s}$, 기린초 $3.040 \times 10^{-5} \text{g/cm}^2/\text{s}$, 별개미취 $2.778 \times 10^{-5} \text{g/cm}^2/\text{s}$, 아주가 $2.656 \times 10^{-5} \text{g/cm}^2/\text{s}$, 비비추 $2.158 \times 10^{-5} \text{g/cm}^2/\text{s}$ 순으로 나타났다.

3. 옥상녹화 단위면적당 CO₂흡수량과 증발산량

앞서 제시된 CO₂흡수량 및 증발산량의 초기 측정치는 각 식물이 가지는 잎 자체의 CO₂흡수량 및 증발산량으로 개별 식물 고유의 CO₂ 흡수 성능 및 증발산성능이라 할 수 있을 것이다. 측정된 CO₂ 흡수량 및 증발산량은 각각의 평균 총엽면적을 기반으로 하여 개체당 CO₂흡수량 및 증발산량으로 환산하였다(Table 6). 이를 실제 옥상녹화면적으로 적용해보기 위해 일반적으로 조경식재 시공시 초본류의 식재밀도로 많이 사용되는 m²당 40본을 기준으로 하여 각 식물별 m²당 CO₂흡수량 및 증발산량을 도출하였다. 여기서 단위면적당 CO₂흡수량 및 증발산량은 식물의 평균적인 엽면적과 착엽수를 기반으로 산출해 냈기 때문에 측정치와 별개로 식물별 엽면적의 대소, 착엽수의 다소에 따라 차이가 나게 되며, 동일 식물이라 하더라도 개체별 생장, 생육상태에 따라 편차가 발생할 수 있다.

계산 결과 m²당 CO₂흡수량은 총 엽면적이 넓은 켈터키블

Table 5. Quantity of evapotranspiration per 1cm² of each plant by value of illuminance

| Value of illumination(lux) | Evapotranspiration quantity(g/cm ² /s) | Value of illumination(lux) | Evapotranspiration quantity(g/cm ² /s) |
|--|---|---|---|
| a. <i>Chrysanthemum zawadskii</i> | | b. <i>Sedum kamtschaticum</i> | |
| 0 | $4.817 \times 10^{-5} \pm 1.486 \times 10^{-5}$ | 0 | $1.96 \times 10^{-5} \pm 0.232 \times 10^{-5}$ |
| 35,000 | $3.239 \times 10^{-5} \pm 0.226 \times 10^{-5}$ | 35,000 | $2.54 \times 10^{-5} \pm 0.498 \times 10^{-5}$ |
| 72,000 | $4.606 \times 10^{-5} \pm 0.427 \times 10^{-5}$ | 72,000 | $2.81 \times 10^{-5} \pm 0.514 \times 10^{-5}$ |
| 100,000 | $7.225 \times 10^{-5} \pm 0.320 \times 10^{-5}$ | 100,000 | $2.97 \times 10^{-5} \pm 0.265 \times 10^{-5}$ |
| 150,000 | $8.581 \times 10^{-5} \pm 0.202 \times 10^{-5}$ | 150,000 | $3.04 \times 10^{-5} \pm 0.389 \times 10^{-5}$ |
| c. <i>Aquilegia buergariana</i> | | d. <i>Aster koraiensis</i> Nakai | |
| 0 | $3.929 \times 10^{-5} \pm 1.239 \times 10^{-5}$ | 0 | $1.383 \times 10^{-5} \pm 0.241 \times 10^{-5}$ |
| 15,000 | $4.194 \times 10^{-5} \pm 1.135 \times 10^{-5}$ | 15,000 | $1.487 \times 10^{-5} \pm 0.287 \times 10^{-5}$ |
| 35,000 | $2.516 \times 10^{-5} \pm 1.013 \times 10^{-5}$ | 35,000 | $1.664 \times 10^{-5} \pm 0.338 \times 10^{-5}$ |
| 72,000 | $2.644 \times 10^{-5} \pm 1.178 \times 10^{-5}$ | 72,000 | $1.905 \times 10^{-5} \pm 0.427 \times 10^{-5}$ |
| 100,000 | $3.027 \times 10^{-5} \pm 1.769 \times 10^{-5}$ | 100,000 | $2.029 \times 10^{-5} \pm 0.019 \times 10^{-5}$ |
| 150,000 | $8.662 \times 10^{-5} \pm 1.895 \times 10^{-5}$ | 150,000 | $2.778 \times 10^{-5} \pm 0.476 \times 10^{-5}$ |
| e. <i>Hosta longipes</i> | | f. <i>Ajuga multiflora</i> | |
| 0 | $1.430 \times 10^{-5} \pm 0.315 \times 10^{-5}$ | 0 | $2.247 \times 10^{-5} \pm 1.844 \times 10^{-5}$ |
| 15,000 | $2.472 \times 10^{-5} \pm 1.396 \times 10^{-5}$ | 15,000 | $1.682 \times 10^{-5} \pm 0.447 \times 10^{-5}$ |
| 35,000 | $2.578 \times 10^{-5} \pm 1.379 \times 10^{-5}$ | 35,000 | $2.22 \times 10^{-5} \pm 0.452 \times 10^{-5}$ |
| 72,000 | $3.233 \times 10^{-5} \pm 1.414 \times 10^{-5}$ | 72,000 | $3.230 \times 10^{-5} \pm 0.317 \times 10^{-5}$ |
| 100,000 | $2.158 \times 10^{-5} \pm 0.318 \times 10^{-5}$ | 100,000 | $3.122 \times 10^{-5} \pm 0.806 \times 10^{-5}$ |
| 150,000 | $2.158 \times 10^{-5} \pm 1.563 \times 10^{-5}$ | 150,000 | $2.656 \times 10^{-5} \pm 0.675 \times 10^{-5}$ |
| g. <i>Poa pratensis</i> | | | |
| 0 | $3.316 \times 10^{-5} \pm 0.494 \times 10^{-5}$ | | |
| 15,000 | $4.750 \times 10^{-5} \pm 0.282 \times 10^{-5}$ | | |
| 35,000 | $5.703 \times 10^{-5} \pm 1.083 \times 10^{-5}$ | | |
| 72,000 | $7.650 \times 10^{-5} \pm 0.801 \times 10^{-5}$ | | |
| 100,000 | $8.405 \times 10^{-5} \pm 0.113 \times 10^{-5}$ | | |
| 150,000 | $8.750 \times 10^{-5} \pm 1.087 \times 10^{-5}$ | | |

Table 6. Quantity of CO₂ Uptake and Evapotranspiration per Unit area of planting

| Scientific name | Leaf area per pot (cm ²) | CO ₂ uptake (150,000 lux) | | | Evapotranspiration (150,000 lux) | | | Standards and planting intensity |
|--------------------------------|--|---|----------------------|---|---|----------------------|---|---|
| | | per unit leaf area(g/cm ² /s) | per pot (g/pot/s) | per unit green roof area(g/m ² /s) | per unit leaf area(g/cm ² /s) | per pot (g/pot/s) | per unit green roof area(g/m ² /s) | |
| <i>Chrysanthemum zawadskii</i> | 79.17 | 21.47×10 ⁻⁶ | 0.0017 | 0.0680 | 8.58×10 ⁻⁵ | 0.0068 | 0.2717 | 12cm pot, |
| <i>Aquilegia buergariana</i> | 307.46 | 12.74×10 ⁻⁶ | 0.0039 | 0.1567 | 8.66×10 ⁻⁵ | 0.0266 | 1.0653 | |
| <i>Aster koraiensis Nakai</i> | 316.52 | 7.480×10 ⁻⁶ | 0.0023 | 0.0947 | 2.78×10 ⁻⁵ | 0.0088 | 0.3517 | |
| <i>Hosta longipes</i> | 316.35 | 5.972×10 ⁻⁶ | 0.0019 | 0.0756 | 2.16×10 ⁻⁵ | 0.0068 | 0.2731 | 40 pot/m ² |
| <i>Ajuga multiflora</i> | 528.36 | 4.733×10 ⁻⁶ | 0.0025 | 0.1000 | 2.66×10 ⁻⁵ | 0.0140 | 0.5613 | |
| <i>Sedum kamtschaticum</i> | 119.75 | 2.537×10 ⁻⁶ | 0.0003 | 0.0122 | 3.04×10 ⁻⁵ | 0.0036 | 0.1456 | |
| <i>Poa pratensis</i> | 1266 | 16.20×10 ⁻⁶ | 0.0205 | 0.8205 | 8.75×10 ⁻⁵ | 0.1108 | 4.4310 | |

루그래스가 0.8205g/m²/s로 가장 많은 흡수량을 보였다. 그 다음으로 매발톱꽃 0.1567g/m²/s, 아주가 0.1000g/m²/s, 별개미취 0.0947g/m²/s, 비비추 0.0756g/m²/s, 구절초 0.0680g/m²/s, 기린초 0.0122g/cm²/s 순으로 나타났다. 실험측정지 결과로는 가장 많은 양의 CO₂를 흡수하는 것으로 나타난 구절초를 비롯하여 대부분의 초화류의 경우 실험측정에 사용했던 pot묘 자체가 아직은 성장초기인 유묘라는 점을 감안할 때, 실제 식재 후 성장 발육 상태에 따라 m²당 CO₂흡수량과 증발산량은 상당히 증가될 수 있다고 판단된다.

CO₂흡수량 측정과 마찬가지로 m² 당 40본의 기준을 적용하여 환산한 m² 당 증발산량은 켄터키블루그래스가 4.431g/m²/s로 가장 많았고, 매발톱꽃 1.0653g/m²/s, 아주가 0.5613g/m²/s, 별개미취 0.3517g/m²/s, 비비추 0.2731g/m²/s, 구절초 0.2717g/m²/s, 기린초 0.1456g/m²/s 순으로 높게 나타났다. 켄터키블루그래스(*Poa pratensis*)는 원산지가 유라시아인 한지형 잔디로 국내에서도 많이 사용되는 종이다. 한냉 습윤지대와 전이지대 뿐만 아니라 한냉 반건조지대와 건조지대에서도 관수관리만 적절히 되면 효과적으로 이용될 수 있다. 특히 이 잔디는 회복력이 좋으며 봄철 녹색화가 빠르고 내습성, 내건성도 좋은 서양잔디이다. 켄터키 블루그래스의 탄소흡수량과 증발산량은 다른 실험식물에 비해 상대적으로 높았다. 켄터키블루그래스의 경우 지하경으로만 번식하여 다른 잔디보다는 인접식물에 주는 피해가 덜하긴 하지만 잔디는 기본적으로 관리를 요하는 식물이므로 옥상녹화 시에는 관리 요구도나 적절한 식재조합 등을 고려하여 도입해야 할 것이다(Lee et al., 2004).

본 연구는 옥상녹화용으로 사용되는 식재식물 중 초본류를 중심으로 CO₂흡수량과 증발산량을 계량화하기 위해 대표적인 옥상녹화식물 7종에 대하여 각각의 광도조건에서의 CO₂교환율 측정을 통해 실험식물의 환경성능을 확인하였다.

이와 같은 결과치를 바탕으로 향후 실제 옥상녹화 식재설계에 있어 디자인의 컨셉에 따라 CO₂흡수량이 많은 식물종

의 선택 및 도입면적을 확대하는 설계를 고려할 수 있고 또한 주간에는 CO₂흡수가 활발한 식물과 야간에도 지속적으로 CO₂를 흡수하는 세덤류의 적절한 조합식재 계획을 통해 주간과 야간에 CO₂흡수작용의 지속성을 유도할 수 있는 식재 설계도 가능할 것이다.

초본류의 경우 야간에 방출하는 이산화탄소와 동절기 휴면상태의 CO₂방출에 대한 문제점을 제기할 수 있으나 식물이 주간에는 흡수하는 이산화탄소량이 야간에 방출하는 이산화탄소보다 큰 값으로, 야간에 방출되는 이산화탄소의 양은 주간에는 흡수되는 이산화탄소의 양에 비해 약 20~40% 밖에 미치지 않는다는 실험 연구(Kim, 2004)와 토양층의 탄소흡수효과를 증명한 관련 연구(Bruce et al., 1999; Ogle et al., 2005)를 볼 때, 옥상녹화가 가지는 잠재적 효과가 더 크다고 판단된다.

그러나 본 실험은 초본류의 환경민감성에 대한 오차를 줄이기 위하여 자연 상태가 아닌 인공 환경에서 진행하였다는 점과 주어진 조도하에서 순간적으로 일어나는 CO₂흡수량과 증발산량을 측정했다는 점에서 연구의 제한점이 있다. 그럼에도 불구하고 옥상녹화의 도시생태환경개선의 효과를 정량적으로 증명하여 저토심 옥상녹화용 식물의 탄소흡수성능으로 인한 도시환경개선효과에 대한 정량적 수치를 확보했다는 데에 의의를 두고자 한다.

추후 옥상녹화식물의 CO₂흡수량과 증발산량에 대해 실질적인 현장측정을 통한 현실적이고 구체적인 식물별 환경성능 데이터의 구축이 시급히 이루어져야 하며 CO₂흡수능력 및 증발산성능이 뛰어난 식물종에 대한 개발 연구가 필요할 것으로 보인다.

인용문헌

- Bruce, J.P., M. Frome, E. Haites, H. Janzen, R. Lal and K. Paustian(1999) Carbon sequestration in soils. Journal of Soil and Water Conservation 54: 382-389.

- Choe, H.S., Y.B. Lee, H.J. Lee and K.K. Kim(2003) The Growth of *Hosta Longipes* by Management Methods on Artificial Ground Greening. *Korean Journal of Environmental Restoration Technology* 6(4): 1-7. (in Korean with English abstract)
- Drennan, P.M. and P.S. Nobel(2000) Responses of CAM species to increasing atmospheric CO₂ concentrations. *Plan, Cell and Environ.* 23: 767-781.
- Herrington, L.P.(1984) Climatic variavles. In E. G. Mcpherson. ed. *Energy - Conserving Site Design*. Washington D.C., ASLA, pp. 59-77.
- Jo, H.K. and D.H. Cho(1998) Annual CO₂ Uptake by Urban Popular Landscape Tree Species. *Korean Journal of Landscape Architecture* 25(2): 38-53. (in Korean with English abstract)
- Jo, H.K., Y.H. Yun and K.E. Lee(1995) Atmospheric CO₂ Sequestration by Urban Greenspace - In the Case of Chuncheon -. *Korean Journal of Landscape Architecture* 23(3): 80-93. (in Korean with English abstract)
- Kim, G.S. and J.S. Lee(2009) Growth Reaction of Some Ground Cover Plant in Korean Native Greening according to Shading Levels Flower Res. *J.* 17(2): 75-80. (in Korean with English abstract)
- Kim, K.N.(2005) Introduction of Grass. Sam-yook University Press, pp. 69-74. (in Korean)
- Kim, M.J.(2004) Physiological responses and CO₂ scavenge of foliage plant under interior condition. master's thesis Konkuk University Horticulture Science Department, pp. 36-85. (in Korean with English abstract)
- Korea Environment Institute(2007) Impacts of Green spaces on air Quality. pp. 24-36. (in Korean)
- Lee, E.H., E.J. Cho, M.Y. Park, D.W. Kim and S.W. Jang(2007) Selecting Plants for the Extensive Rooftop Greening Based on Herbal Plants. *Korean Journal of Environmental Restoration Technology* 10(2): 84-96. (in Korean with English abstract)
- Lee, J.J. and S.H. Choi(2009) A study on the Development of the Planning Indicator for Carbon Neutral on the District Unit Plan. *Journal of the Korea Planners Association* 44(4): 119-131. (in Korean with English abstract)
- Lee, J.S., H.K. Hong., S.J. Jung., S.C. Lee and J.S. Yoon(2004) Comparison of Drainage Treatment on Growth of *Zoysia japonica*, *Poa pratensis*, and *Agrostis palustris* in Step Damage Area. *Korean Journal of Horticulture Science and Technology* 22(2): 69. (in Korean with English abstract)
- Lee, S.D.(2004) Classification of CAM Types and Characteristics of Diurnal CO₂ Exchange on Different Light and Temperature Environments in Cacti and Succulents. Konkuk University Graduate School Doctoral Thesis, pp. 80-130. (in Korean with English abstract)
- Lee, S.T. and J.S. Kim(2004) Temperature Changes of Indoor and Outdoor by Grass Planting Block in Planting of Roof Area. *Korean Journal of Environmental Restoration Technology* 7(6): 54-60. (in Korean with English abstract)
- Ministry of Knowledge Economy(2002) Research of Coping strategies on Convention on Climate Change and kyoto protocol. Korea energy Economics Institute. (in Korean)
- Ogle, S.M., F.J. Breidt and K. Paustian(2005) Agricultural management impacts on soil organic carbon storage under moist and dry climatic conditions of temperature and tropical regions. *Biogeochemistry* 72: 87-121.
- Paul Schlyter(2003) Radiometry and photometry in astronomy. (<http://stjarnhimlen.se/comp/radfaq.html>).
- Seoul Metropolitan Government(2007) Manual of Management and construction Green roof system. pp. 1-24. (in Korean)
- Shin, W.K.(1988) A study on dry matter production and growth analysis of herbaceous ground cover under various light intensity. *Korean Journal of Landscape Architecture* 15(3): 51-69. (in Korean with English abstract)
- Yang, B.E.(2004) Green roof technology of Korea. *Korean Journal of Environmental Restoration Technology* 7(4): 1-7. (in Korean)