

## 인공지반녹화식물의 증발산량 측정을 통한 단지내 열환경 개선 효과 예측

# Effects of Artificial Ground Greening on Microclimate Improvement through Measurement of Evapotranspiration

안근영<sup>1</sup> · 한승원<sup>2</sup> · 이은희<sup>3</sup>

<sup>1</sup>서울여자대학교 조경연구실, <sup>2</sup>농촌진흥청 원예특작과학원,

<sup>3</sup>서울여자대학교 환경생명과학부

### 서론

도시는 높은 개발밀도와 부족한 녹지 및 오픈스페이스, 교통의 과밀, 산업생산, 폐기물에 의한 대기 및 수질오염을 야기하고 있으며 건축물과 토양의 열용량 증가와 함께 연평균 0.5°C~1.5°C의 기온증가가 일어나고 있다(이동근, 2005). 서울시가 구축한 도시생태현황도에 의하면 서울시 전체면적 중 37.9%인 230.7 km<sup>2</sup>가 토지면적의 90% 이상이 불투수성 포장으로 조성된 지역이며 토지의 50% 이상 불투수성 포장으로 조성된 지역이 서울시면적의 51%로 나타났다. 이러한 관점에서 도시열섬현상, 도시생태계파괴, 도시의 제반 환경문제를 해결할 수 있는 최선의 대안은 도시내 감소된 녹지를 회복하고 확충하여 물순환을 회복, 생태환경을 개선하고, 생물서식공간을 조성하는 것이라 할 수 있다. 도시내 부족한 녹지를 보충하고 도시생태환경 및 경관개선을 위한 다양한 효과이외에도 탄소저감, 기후변화에 대응하는 녹색기술로서 주목받고 있으며 이와 관련된 인공지반녹화의 효과를 규명하기 위해 국내외에서 많은 연구가 수행되었다. 그러나 도시의 열섬현상완화 및 미기후를 개선하기 위한 녹지의 증발산량에 대한 연구는 주로 수목이나 대규모 녹지, 산림을 중심으로 이루어졌고, 특히 도시내 녹지공간의 현실적 대안으로 떠오르고 있는 인공지반녹화식물에 대한 증발산량에 관한 연구는 미미하고 특히, 잠재적 녹지면적에서의 기여가 큰 기존건축물에 적용 가능한 저토심 인공지반녹화용 초본류에 대한 증발산량의 효과를 정량화한 연구는 미흡하다.

본 연구는 생태환경적 측면에서 손쉽게 보급할 수 있는

저토심 인공지반녹화에 적용 가능한 초본류 및 지피식물을 중심으로 증발산량, 광합성능을 정량화하여 도시미기후 관점에서의 인공지반녹화식물의 효과를 살펴보고자 하였다.

또한 이차적인 목적은 정량화된 환경성능 수치를 토대로 인공지반면적에 대입하여 해당지역 내에서 가능한 열환경 개선효과 나아가 미기후 효과 예측에 이용하고자 연구를 실시하였다.

### 연구내용 및 방법

#### 1. 연구범위 및 내용

인공지반녹화식물의 미기후 개선에 대한 증발산성능을 정량화하는 것을 목표로 하는 본 연구의 범위는 크게 3단계로 진행하였다. 첫 번째 단계로 인공지반녹화에 가장 많이 적용되는 식물 13종을 대상으로 각각의 증발산량을 측정하여 각 식물의 증발산성능을 정량화하는 것이다. 두 번째 단계는 인공지반녹화식물의 증발산량으로 인한 주변대기환경 온도조절효과와 기능을 검증하기위해 비녹화지와 녹화지의 온도 및 기온차 측정, 녹화지 중 식재 식물별 온도 및 기온차에 대해 분석하였다. 세 번째 단계로 정량화된 식물별 환경성능을 실제 면적에 적용하여 모델링하는 단계로서 일차적으로 건물단위규모의 적용을 검토하였고, 이차적으로 건물군이 집합된 단지규모의 적용을 검토하여 인공지반녹화의 단지적용을 통한 미기후 개선효과를 예측하였다.

표 1. 연구내용

주요 연구내용	공간적 범위	연구 내용
인공지반 녹화식물의 증발산량 측정	녹화 식재 단위	• 녹화식물별 증발산량 • 녹화식물의 m <sup>2</sup> 당 증발산량 산출
	녹화지	• 인공녹화지와 비녹화지의 미기후 특성 비 교시험
적용 모델링 평가	단지 규모	• 지구규모 적용대상지 분석 • 녹화가능면적 산출 • 단지내 전체 증발산량 산출

## 2. 연구방법

실험에 적용할 식물초종의 선정은 기존 인공지반녹화 조성지 총 80개소의 식재식물을 교목, 관목, 초본류로 구분하여 조사한 결과를 토대로 초본류를 중심으로 가장 많은 빈도수를 보인 상위 10위 안에서 초화류 6종, 잔디 1종, 관목 3종을 선택하였고, 추가로 인공지반녹화에서 수직적 녹화라 할 수 있는 벽면녹화의 만경류 3종을 선택하였다. 선정된 식물은 초화류로는 구절초 (*Chrysanthemum zawadskii* var. *latilobum*), 매발톱꽃 (*Aquilegia buergeriana* var. *oxysepala*), 별개미취 (*Aster koraiensis*), 비비추 (*Hosta longipes*), 아주가 (*Ajuga multiflora*), 기린초 (*Sedum kamatschaticum*)이고, 잔디로는 켄터키블루그래스 (*Poa pratensis*), 관목으로는 산철쭉 (*Rhododendron yedoense* var. *poukhanense*), 남천 (*Nandina domestica*), 산수국 (*Hydrangea serrata*)을 선정하였고 만경류로 줄사철 (*Euonymus fortunei*), 송악 (*Hedera rhombea*), 마삭줄 (*Trachelospermum asiaticum* Nakai var. *intermedium*)을 선택하였다(표 2).

증발산량 측정 실험은 미국 LI-COR사에서 제작한 LI-COR, LI-6400에 의한 광합성능의 측정을 통해 각 식물의 증발산량을 계량화하였다. 단위 엽면적 당 증발산량을 식물개체별 총 증발산량으로 전환하기 위하여 엽면적과 각 식물별 체적을 산출한 결과는 표 2와 같다. 실험 식물은 수분부족에 의한 영향이 없도록 측정 2일전에 물을 충분히 공급하고 주로 광합성이 활발히 일어나는 오전 8시에서 오후 1시 사이에 측정을 수행하였고, 암반응상태에서의 흡수 양상을 보기위해 야간에 보온 측정하였다. 측정 시기는 식물의 새순이 성장하여 식물의 잎이 가장 클 시기인 5월에 시작하였고 가을에 낙엽이 지기 전인 11월까지 반복적으로

표 2. 식물별 평균 착엽수 및 총엽면적

식물	실측엽면적 (cm <sup>2</sup> )	개체당 착엽수 (개)	부피(cm <sup>3</sup> )	개체당 총 엽면적(cm <sup>2</sup> )
구절초	3.77±0.85	21.0	1766	79.17
매발톱꽃	16.53±2.18	18.6	1384	307.46
별개미취	20.29± 3.56	15.6	1692	316.52
비비추	20.41±4.42	15.5	1231	316.35
아주가	18.87±3.83	28.0	2119	528.36
기린초	5.37±0.96	22.3	1413	119.75
켄터키블루그래스	2.11± 0.50	598.2	1200	1266.02
산철쭉	3.80±1.16	743.1	17847	2823.10
남천	3.81±0.47	156.3	13266	606.84
산수국	23.66±3.30	103.5	15919	2436.98
송악	9.46±0.90	153.5	10368	1452.11
줄사철	4.34±0.49	134.5	2550	583.73
마삭줄	4.81±1.00	217.4	10500	1043.77

월 2회 3반복 측정하였다. 증발산량 측정 시 광도는 0lux, 15,000lux, 35,000lux, 72,000lux, 100,000lux, 150,000lux로 변수를 주었고, CO<sub>2</sub>주입량은 평소 대기상태의 농도와 유사한 400μmol/mol 조건이었으며 유속은 500μmol/s로 고정하여 측정하였다.

단위엽면적 당 증발산량은 식재밀도 기준에 맞추어 m<sup>2</sup>당 증발산량으로 환산하였는데 이 때 적용기준은 측정치 중 맑은 한낮 옥상표면의 조도인 150,000 lux에서의 측정치를 사용하였다.

인공지반녹화식물의 증발산량을 토대로 생태적 개선효과에 대해 구명하고자 단지규모의 인공지반녹화 모델링을 시도하였다. 대상지 선정은 도시화 이후부터 공장지대로 유명한 구로본동 아파트형 공구상가 단지로 총 면적이 약 175,333m<sup>2</sup>이다. 인공지반녹화도출 가능면적을 검토하기 위하여 현재 상용위성영상지도와 1 : 1,000 수치지도를 이용하여 해당지역의 녹지지역 및 옥상녹화지역, 옥상녹화가능면적을 도출하였다. 옥상녹화 가능면적에 증발산량을 적용, 대입하여 전체 단지 내 증발산총량을 산출하였다. 본 대상지가 기존건축물임을 감안하여 녹화유형은 생태형 인공지반녹화를 적용하는 조건을 전제하여, 가능면적에 초본류 70%, 잔디 30%를 각각 적용하여 계산하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 식물별 증발산량

인공지반녹화식물 13종을 대상으로 조도변화에 따라 증발산량을 측정된 결과, 일반적으로 환경조건 즉, 조도가 증가함에 따라 증발산량도 차차 증가하는 것으로 나타났다.

초본류의 증발산량을 측정 결과, 초본류는 아주가와 비비추를 제외한 대부분이 낮은 광도에서는 증발산량이 낮았고, 광도가 차차 높아질수록 증산이 활발해졌다(그림 1). 구절초와 매발톱꽃, 기린초는 광도에 따라 비례하여 15만 lux에서 가장 높은 증발산량을 보였다. 벌개미취는 암반응 조건에서 광도가 주어지자 증발산량이 줄어들었다가 차차 증가하여 15만lux에서는 증산이 암반응 조건에 비해 활발해졌다. 켄터키블루그래스와 매발톱꽃, 구절초는 실험식물 중 가장 증발산량이 많은 식물로 드러났다. 특히 켄터키블루그래스는 암반응조건에서도 증발산량이  $5.00 \times 10^{-5} \text{g/cm}^2$ 였고 15만 lux 조건에서는  $13.33 \times 10^{-5} \text{g/cm}^2$ 의 양을 발산했다. 이러한 수치는 잔디가 15만 lux 조건에서 많은  $\text{CO}_2$ 흡수량을 나타냈던 현상과 같이 이해할 수 있다. 켄터키블루그래스의 경우, 잔디 중 특히 요구수량이 많은 품종으로 적절한 환경이 주어지면 광합성과 함께 증산작용이 매우 활발하여 여름철 하루 동안  $1\text{m}^2$  당 20L 정도의 수분을 발산해내는 것으로 알려져 있다(김경남, 1995). 초본류의 경우 아주가와 비비추를 제외하고 0lux 조건에서의 증발산량에 비해 15만 lux 조건에서 증발산작용이 더욱 활발해지는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 아주가와 비비추는 광 보상점이 다른식물에 비하여 낮은 식물(신우균, 1988; 김귀순, 2009)로 고풍도 조건보다는 차광조건에서  $\text{CO}_2$ 흡수율이 양호하게 나타나 광합성과 직결되는 증발산량 또한 추이가 비슷한 것으로

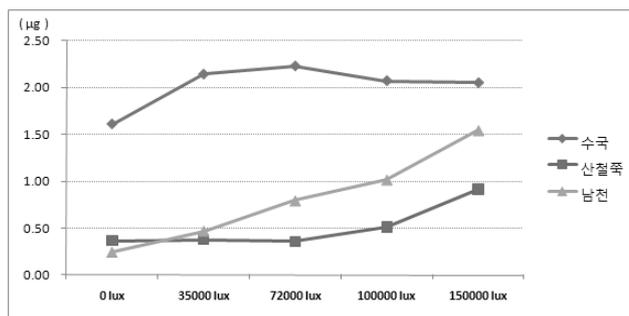


그림 2. 관목의 증발산량 변화양상

보인다. 증발산량이 많은 식물은  $\text{CO}_2$ 흡수량과 유사하게 켄터키블루그래스, 매발톱꽃, 구절초 순으로 나타났다.

관목의 경우 남천과 산철쭉은 암반응 조건에서 증발산량이  $0.409 \times 10^{-5} \text{g/cm}^2$ ,  $0.609 \times 10^{-5} \text{g/cm}^2$ 로 산수국의  $2.68 \times 10^{-5} \text{g/cm}^2$ 에 비해 저조한 것으로 나타났다. 광도가 증가하면서 산수국은 72000lux에서  $3.713 \times 10^{-5} \text{g/cm}^2$ 로 가장 많은 증발산량을 보였고, 그 이후 약간 줄었으나 일정수준을 유지하는 경향을 보였다. 산철쭉은 광도 증가와 비례하여 15만 lux에서  $1.523 \times 10^{-5} \text{g/cm}^2$ 의 증발산량을 나타냈다. 반면 남천은 광도 증가와 함께 서서히 증가하여 15만 lux에서  $2.575 \times 10^{-5} \text{g/cm}^2$ 의 증발산량을 보였다(그림 2).

만경류 중 송악은 광도가 증가함에 따라 증발산량도 차차 증가하는 경향을 보였으나 15만lux에서는 다른 식물에 비해 증발산량이 저조한 경향을 보였다. 마삭줄은 전체적으로 광도 증가와 상관없이 증발산량이 저조했으며, 암반응조건에서 증발산량이 가장 많이 나왔다. 줄사철은 35,000lux에서 증산작용이 주춤했다가 다시 활발해져 15만lux에서  $3.650 \times 10^{-5} \text{g/cm}^2$ 의 증발산량을 나타냈다(그림 3).

측정된 실험식물별 증발산량은 각 식물별 개체당 총 엽면적을 곱하여 개체 당 증발산량으로 환산하였다(표 3). 식물

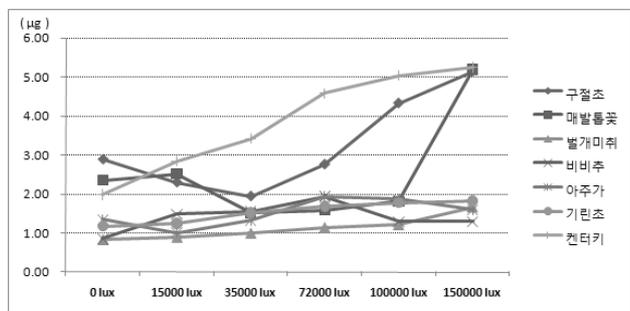


그림 1. 초본류의 증발산량 변화양상

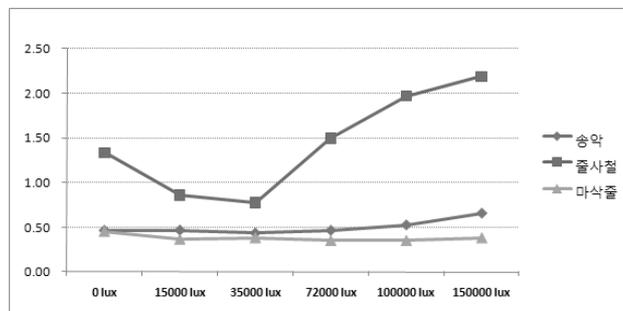


그림 3. 만경류의 증발산량 변화양상

표 3. 실험식물의 단위면적당 증발산량

식물명	개체당 엽면적	증발산량			규격 및 식재밀도
		g/cm <sup>2</sup>	g/pot	g/m <sup>2</sup>	
구절초	79.17	8.58×10 <sup>-5</sup>	0.0068	0.2717	4치 40본/m <sup>2</sup>
매발톱꽃	307.46	8.66×10 <sup>-5</sup>	0.0266	1.0653	4치 40본/m <sup>2</sup>
별개미취	316.52	2.78×10 <sup>-5</sup>	0.0088	0.3517	4치 40본/m <sup>2</sup>
비비추	316.35	2.16×10 <sup>-5</sup>	0.0068	0.2731	4치 40본/m <sup>2</sup>
이주가	528.36	2.66×10 <sup>-5</sup>	0.0140	0.5613	4치 40본/m <sup>2</sup>
기린초	119.75	3.04×10 <sup>-5</sup>	0.0036	0.1456	4치 40본/m <sup>2</sup>
켄터키 블루그래스	1266	8.75×10 <sup>-5</sup>	0.1108	4.4310	10cm <sup>2</sup> 40본/m <sup>2</sup>
남천	606.84	2.57×10 <sup>-5</sup>	0.0156	0.1406	H0.3*
산철쭉	2823	1.52×10 <sup>-5</sup>	0.0430	0.3870	w0.3
산수국	2437	3.41×10 <sup>-5</sup>	0.0832	0.7488	9본/m <sup>2</sup>
줄사철	583.73	3.65×10 <sup>-5</sup>	0.0213	0.3409	4치 16본/m <sup>2</sup>
송악	1452.11	1.08×10 <sup>-5</sup>	0.0158	0.1423	L0.3
마삭줄	1043.77	0.63×10 <sup>-5</sup>	0.0067	0.0599	9본/m <sup>2</sup>

별 m<sup>2</sup> 당 증발산량의 환산 본실험에서 도출된 증발산량의 적용을 용이하게 하기 위해, 일반적으로 식재시공 시 초본류의 식재밀도로 많이 사용되는 m<sup>2</sup> 당 40본의 기준을 적용하였고, 관목의 경우는 m<sup>2</sup> 당 9본, 만경류의 경우도 9본을 적용하였다. 이러한 기준을 적용하여 환산한 m<sup>2</sup> 당 증발산량은 켄터키블루그래스가 4.431g/m<sup>2</sup>로 가장 많았고, 매발톱꽃 1.0653 g/m<sup>2</sup>, 산수국이 0.7488g/m<sup>2</sup>, 산철쭉이 0.3870 g/m<sup>2</sup>, 별개미취가 0.3517g/m<sup>2</sup> 순으로 나타났다.

2. 단지 규모 모델링

저토심 인공지반녹화용 식물의 m<sup>2</sup>당 증발산량을 산정한 결과를 통해 실제 도시내에서 일정지역에 옥상녹화 지구 또는 시범사업지구 등을 지정하여 옥상녹화를 실시한 경우와 유사하게 일정지역을 대상으로 옥상녹화가 가능한 면적에 전면적으로 적용했을 때 녹화지의 증발산량으로 인한 열환경 나아가 미기후개선 완화 효과를 산출한 후 지역 내에서 옥상녹화가 가지는 녹지로서의 열환경성능을 모델링

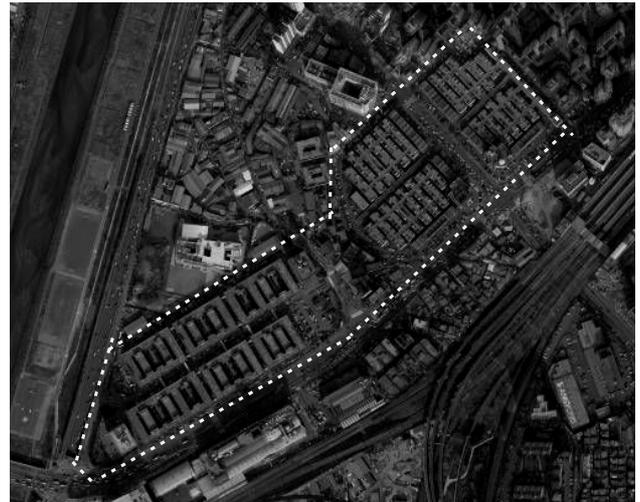


그림 4. 사례지역의 인공영상

한 결과는 다음과 같다.

구로본동에 위치한 공단 유통시설단지인 대상지일대는 주변도로를 포함하여 전체면적이 175,333.19m<sup>2</sup> 로 인공영상사진을 참조하여 기존의 녹지면적, 지붕유형, 시설물 면적을 조사하였다(그림 4). 대상지내 녹지현황을 보면 유통상가 주차장 상부에 일부 조성된 것 이외에 공공녹지가 거의 없으며 410m<sup>2</sup> 정도에 지나지 않는다. 유통상가 내부 중정에 인공지반녹화지가 동마다 370~380m<sup>2</sup> 규모로 7개동 조성되어 있다. 이를 녹지면적에 편입시킨다면 대상지내 녹지면적은 총 2663.86m<sup>2</sup>로 전체면적의 1.5%를 차지한다.

옥상지역 중 시설물 면적은 총 771.13m<sup>2</sup>로 전체 옥상면적의 1.1%를 차지하고 있다. 지역 내 평지붕면적은 67,588m<sup>2</sup>이며, 경사지붕면적은 4,447.6m<sup>2</sup>였고, 평지붕 면적 중 옥상시설물 면적을 제외한 면적이 66,817.07m<sup>2</sup>이다. 대부분이 건물주변 주차장 녹지와 가로수로서 기존녹지가 거의 없으며 전체면적의 1.5%를 차지하였고, 아파트형 공장내부 중정공간에 인공지반녹화가 일부 조성되어 있었다. 전체 부지면적 중 옥상녹화의 도입이 가능한 평지붕건물의 비율은 약 38.5%였으며, 평지붕면적 중 1.1%에 해당하는 일부 시설물 면적 약 771m<sup>2</sup>를 제외한 면적에 인공지반녹화가 가능할 것이라 판단된다. 경사지붕면적은 4,447.6m<sup>2</sup>로 평지붕과 함께 저토심 매트형 옥상녹화시스템으로 조성할 경우 전체 옥상녹화 가능지역은 71,264.67m<sup>2</sup>으로 확대가 가능할 것이다(표 4).

표 4. 옥상녹화가능면적 산출

구분	전체 부지면적	평지붕	경사 지붕	기존녹지 (단지내 녹지포함)	옥상 시설면 적	경사지붕 포함면적
면적 (m <sup>2</sup> )	175,333	66,817	4,447	2,664 (411)	771	71,265
비율 (%)	100	38	2.5	1.5(0.2)	0.4	40

대상지 분석결과로 단지의 전체 부지면적과 옥상녹화 가능한 지역의 면적이 도출되었다. 대상지 건물이 하중부담의 우려가 있는 기존 건축물임을 고려하여 앞서 산출된 식물별 m<sup>2</sup> 당 증발산량을 토대로 대상지내 옥상녹화가능지역에 저토심의 생태형 인공지반녹화를 적용하였다.

전체 부지면적 중 옥상녹화가 가능한 평지붕면적은 총 66,817m<sup>2</sup>이었다. 경사지붕의 면적 4,447.6m<sup>2</sup>까지 포함한다면 전체 가능면적은 71,264.67m<sup>2</sup>이다.

m<sup>2</sup> 당 증발산량이 높은 초본류인 매발톱꽃, 벌개미취, 아주가, 구절초와 세덤류 기린초를 혼합하여 전체식재면적의 70%인 46,772m<sup>2</sup>를, 켄터키블루그래스로 30%인 20,045m<sup>2</sup>를 녹화하였다고 가정하여 계산한 결과는 다음 표와 같다 (표 5). 단, 본 연구에서 실험시 측정했던 식물의 착엽수 및 체적과 유사하고, m<sup>2</sup>당 식재본수가 초본류 40본/m<sup>2</sup>과 동

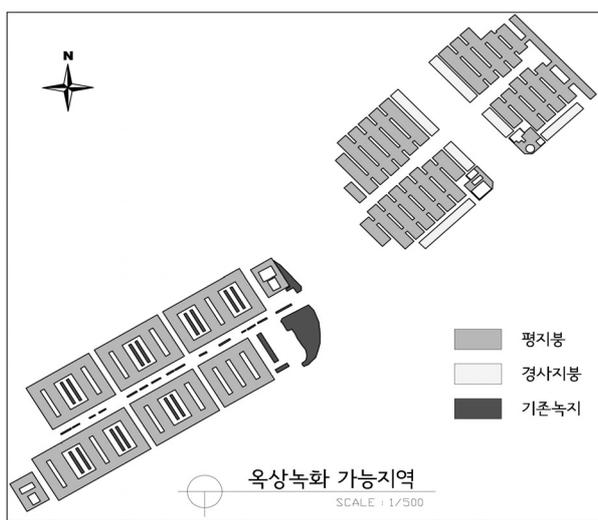


그림 5. 옥상녹화 가능지역을 포함한 대상지내 녹지면적

표 5. 대상지 증발산량 산출

	초본류(m)	잔디(m)	개선효과
평지붕 녹화 (66,817m <sup>2</sup> )	매발톱꽃, 벌개미취, 아주가, 구절초, 기린초 혼합식재 49.58kg/s	켄터키 블루그래스 135.34kg/s	증발산량 181.87kg/s

일하다는 조건에서이며, 외부환경 조건 또한 평균 낮기온이 25℃ 정도의 맑은 날 바람이 적당히 있는 조건일 때 순간적으로 발생 가능한 증발산량이다.

적용 결과 본 연구 대상단지인 구로동 공구상가단지 평지붕 66,817m<sup>2</sup>을 저토심 인공지반녹화로 조성할 때 맑은 날 주간 증발산총량은 181.87kg/s로 나타났다. 이 결과는 전체 단지 지역 175,333.19m<sup>2</sup>에서 40%에 해당하는 면적인 66,817m<sup>2</sup>의 저토심 인공지반녹화면적에서 발산되는 증발산량은 지역 내 미기후에 긍정적 역할을 미칠 것으로 유추가 가능하다.

본 연구에서 도출한 인공지반녹화용 초본류와 잔디의 증발산량의 수치는 외부환경인자 및 변수를 최소화한, 인공환경에서의 실험기기를 통한 측정이기 때문에 실험 결과를 단순하게 현장에 그대로 적용하기에는 많은 한계점이 있으리라 생각된다. 다만 모델링을 통하여 일정규모 이상의 인공지반녹화가 도시 내에서 매스단위로 적용이 되었을 때 나타날 수 있는 긍정적인 효과를 예측해 보는 데에 의의가 있을 것이다.

## 인용문헌

김경남. 2005. 잔디학개론. 삼육대학교 출판부. pp.69-74.

김귀순, 이정식. 2009. 몇 가지 자생 지피식물의 차광에 따른 생장반응. Flower Res. J. 17(2) : 75-80.

신우균. 1988. 광도를 달리한 지피식물 인공군락의 물질생산과 성장해석에 관한 연구- 개백문동과 아주가를 중심으로 -. 한국조경학회지 15(3) : 51~69.

안계복, 김기선. 1986. 식물의 온도 완화효과에 관한 기초적 연구. 한국조경학회지 14(1): 1~13.

이동근, 오승환, 윤소원, 장성완. 2005. 옥상녹화조성에 따른 온도 저감효과에 관한 연구- 서울대학교 실험구를 중심으로-. 한국환경복원녹화기술학회지 8(6) : 34~44.

이은엽, 문석기, 심상렬. 1996. 도시녹지의 기온 및 지온완화효과에

- 관한 연구. 한국 조경학회지 24(1): 65~78.
- 조현길, 안태원. 2006. 도시 수목식재와 미기후 개선의 상관성 구명. 한국조경학회지 34(5) : 70~75.
- Herrington, L.P. 1984. Climatic variavles. In E. G. Mcpherson. ed. Energy - Conserving Site Design. Washington D.C. ASLA. pp59-77.
- Moyer, K. 2005. Waterloo Green Roof Feasibility Study-Summary, Greening Rooftops for Sustainable Communities, Washington, DC, May 4-6.
- Terry, M. and L, Tom. 2005. Update on portland's integrated cost analysis for widespread green implementation, executive summary, Greening Rooftops for Sustainable Communities, Washington, DC, May 4-6.
- T. R. Oke (1982). "The energetic basis of the urban heat island". Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 108: 1-24.