

선태식물을 이용한 인공구조물 녹화가능성에 관한 연구

A Study on the Use of Bryophyte in Greening Man-made Structures

김용규* 장혜숙** 김용**
Kim, Yong Kyu Chang, Hea Sook Kim, Yong

Abstract

This research focuses primarily on the feasibility of applying bryophyte to man-made structures in modern urban environment. The study is based both on the role of bryophyte known in the process of the naturalization that life has come on the land and the physiological and ecological characteristics of bryophyte. The primary characteristics of this species lie in its desiccation-tolerance and poikilohydry that supports its enduring survival even under the desperate environmental conditions. The monitoring of applying bryophyte to man-made structures has shown us that bryophyte could control microclimate conditions, help to mitigate flood by reducing runoff, and lessen thermal conductivity, etc. The application of bryophyte to man-made structures has just started since 2002. Even though efforts to use bryophyte in greening man-made structures in Japan and Korea have resulted in both successes and failures, it is noticeable that there has been quite much technical progress in using this unique plant species.

키워드 : 선태식물, 인공구조물, 자연화, 녹화

Key words : Bryophyte, manmade structure, naturalization, greening

1. 서론

생태계 구성종(構成種)의 하나로서 인간이 영속적인 삶을 유지하기 위해 생태적 원리가 작동하는 생태계(ecosystem)에 존재해야 한다. 급격한 산업화와 도시화의 결과물인 현대도시들은 대기, 수질, 토양 등의 환경오염, 도시 홍수, 열대야, 열섬 등 이상 기후 징후, 날로 줄어드는 생물 서식 공간 등 많은 생태적인 문제를 안고 있다. 도시라는 생태계를 유지시키는 에너지와 물질 등은 이미 입·출력에서 불균형이 초래된 지 오래이다. 외부에서 내부로, 내부에서 외부로 에너지와 물질을 강제적으로 공급하거나 배출하지 않으면 도시는 생태계로서의 기능 유지가 어렵다. 서울시의 경우 2020년이 되면 2005년에 비해 1인당 에너지 사용량이 0.94 TOE/년에서 1.23TOE/년으로 약 30%이상 증가할 것으로 예측되고 있다¹⁾. 철저히 종속영양계의 속성을 지닌 생태계이다. 최근 ‘생태계로서 도시’의 물질 순환기능을 강화하기 위한 ‘생태 면적율’, ‘친환경 건물 인증제도(Green Building)’, 도시 녹화를 장려하는 지방자치단체의 정책, 시민단체의 압력, 이를 뒷받침하는 기술 개발 노력 등 일련의 움직임은 도시의 생

태계 기능 회복에 기대감을 갖게 한다.

도시화의 외형적 특징은 ‘도시 환경의 무기질화(無機質化)’라 할 수 있다. 도시는 기능의 효율적 수행을 위해 철, 유리, 시멘트 등 무기 재료를 이용한다. 자연 재료만으로는 집중화, 효율화가 제한적이기에 무기 재료들이 갖는 장점들을 활용하여 도시는 고도화, 복합화의 효율성을 추구한다. 서울시는 도시화지역이 2005년 현재 약 60%에 이르며, 이중 토양 포장도는 70%에 달하고 아스팔트, 콘크리트, 보도블록 등 불투수 포장면적은 약 95%에 이르고 있다²⁾³⁾. 이러한 물리적 환경의 무기질화는 반대급부로 열대야, 도시 열섬 효과, 도시 홍수 등 환경의 질적 저하를 초래하여 구성원인 사람의 삶의 질에 영향을 준다.

무기질화된 도시에 식물을 도입하는 일은 갖가지 오염, 기후 변화, 서식처 파괴 등의 문제를 완화시키거나 해소하는데 일조할 수 있다는 점에서 많은 관심을 받고 있다. 무기질화된 도시환경에서 식물은 관상, 휴식, 그늘 제공, 차폐, 가로수, 소생태계 조성 등의 목적으로 공원, 옥상, 벽면, 가로, 건물 주변 등의 장소에 도입된다. 도시에서의 동물과 식물 등 생물적 구성요소는 그동안 자연 지역에 비해 가치가 없는, 우연적 요소로 인식되어 오다가 인간

* 교신저자, 일송환경복원(주) 대표이사 (ykim0001@hanmail.net)

** 일송환경복원(주)

1) 서울시정개발연구원(2006), 서울시 온실가스 저감 목표 수립 및 이행 계획 평가, p.56

2) 서울특별시(2000), 도시생태개념의 도시계획에의 적용을 위한 서울시 비오톱 현황조사 및 생태도시 조성 지침 수립 - 1차년도 보고서, pp.63-71.

3) 서울그린트러스트(2005), 서울 그린비전 2020 실천전략 - 그린을 통한 도시환경 혁신 요약보고서, pp.17-21.

에 의해 창출된 도시 환경이 이들에게 나름의 서식처를 제공하고 생물 군집을 형성시킨다는 연구결과들이 밝혀지면서 기대를 모으고 있다⁴⁾. 도시생태계에서 특히 옥상, 지붕, 벽면 등 인공지반에의 식생도입은 자연 상태의 녹지 확보가 어려운 현실을 감안할 때 중요한 녹지 확보 수단이다.

지금까지 옥상, 벽면, 경사면 등 인공지반에 도입되는 식물은 열악한 환경에 잘 견디는 식물을 선발하거나, 충분한 토심을 확보하여 자연 지반과 별반 차이 없는 식생을 도입하고 이 들을 제대로 생육시키기 위한 토양 기반 조성에 초점이 맞추어 졌다. 자연 천이과정에서 보면 다년생 초본과 교·관목의 도입을 목표로 이들 식생이 요구하는 조건을 하부구조에 조성하는 방식으로 인공지반 녹화가 시도되고 있다. 이들 식물은 진화 측면에서 안정된 환경이 형성된 후에 나타난 고등 식물들이다. 열악한 환경에서 이들 식생이 유지되려면 안정된 식재 기반의 마련과 지속적인 에너지 투입이 필수적이다.

본 연구는 무기질화된 도시 환경에 자연을 도입하는 지금까지의 방식과 구별되는, 새로운 자연 도입 방식에 대한 가능성을 고찰하고자 한다. 새로운 자연도입 방식은 식생도입의 목표를 자연 천이의 초기 단계에 두고 이 들이 제대로 정착하게 해줌으로써 나머지는 도시라는 독특한 생태계에 의해 생태적 천이가 진행되도록 하는 방식이다.

자연 천이의 초기 단계를 형성하는 대표적인 식물은 선태식물(bryophyte)이다. 자연 천이는 무기질 환경에 선태식물이 정착하여 미세기후를 형성하고 이를 바탕으로 초본류가 도입되고 뒤이어 목본류가 도입되는 단계를 거친다. 가장 극단적인 환경에서 생존하는 것이 선태식물인 셈이다. 선태식물에 대한 국내 연구는 일천하며, 특히 생리적, 생태적 특성에 대한 연구는 전무한 것이 현실이다. 선태식물이 지닌 어떤 특성이 혹독한 환경 속에서 이들의 생존을 가능케 한 것인지에 대한 이해가 선행되어야 이를 활용하는 연구들이 가능하게 된다. 본 연구는 그 첫 단계로 선태식물에 대한 문헌 분석을 통해 선태식물의 어떤 특성이 녹화 소재로서의 도입 가능성을 제시하는지를 이론적으로 고찰하고자 한다. 이론적 고찰과 더불어 일부를 중심으로 선태식물이 환경적으로 이용된 사례를 수집하여 제시함으로써 녹화소재로서 선태식물의 이용 가능성을 보여 주고자 한다. 선태식물은 무기재료 일색의 물리적 환경, 화석 연료로 작동되는 현대 도시에 자연이 보여준 지혜, 무생명의 공간이 생명의 공간으로 전환되는, 자연화 과정(naturalization)의 첫 단계를 제공해 줄 수 있을 것으로 기대된다. 이를 통해 인공지반을 녹화하기 위한 식물 소재에 있어 보다 넓어진 선택의 폭을 마련하여 기존의 녹화 방식과 상호 보완적으로 도시 생태계의 건강성을 추구하고자 한다.

4) 서울시정개발연구원(2001), 서울시 도시생태계의 장기 모니터링방안 연구, p.11. Sukopp, H.(1998), Scientific and practical Aspects. In *Urban Ecology*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp.3-16.에서 재인용

2. 인공지반 녹화의 연구 경향

인공지반은 녹화대상 면(面)의 기울기에 따라 평면, 경사면, 수직면으로 구분되어 식생이 도입된다. 인공지반 녹화를 위한 관련 연구는 인공지반의 구조적 특성, 특히 건축물과 관련된 녹화시스템을 개발하려는 연구와 효율적인 녹화 기반용 인공 토양에 대한 연구, 도입 가능한 식물에 대한 연구 등 3가지로 범주화할 수 있다. 각 연구는 해당 옥상 녹화시스템의 적용으로 얻는 온도 저감효과, 우수유출 저감 효과 등 환경적 효과와 도입 가능 식생, 식물의 내건성, 식생천이 등에 대한 결과를 제안하고 있다. 전반적인 연구 경향은 경량화, 저관리형 시스템(두께 10cm 내외)에 세덤 식물과 자생 초화류를 도입하고 인공토양은 무기질 재료(필라이트, 버미큘라이트 등)를 기반으로 유기물(피트모스, 코코피트 등)을 첨가하여 식재 기반을 조성하는 경향을 보이고 있다.

선태식물의 도입은 경량화, 무관리/저관리형의 기술 개발방향과 일치됨은 물론 도입식물측면에서 다양성 증대, 녹화시스템 측면에서도 초경량의 하부구조를 형성할 수 있어 하중 부담 없이 녹화 대상을 확대할 수 있으리라 사료된다.

2.1 인공지반 녹화 시스템 관련 연구

건물의 단열 및 보온, 방수층 보호와 녹화시스템과의 관계 설정을 통해 옥상녹화 시스템을 개발하려는 연구가 진행되어왔다. 이 분야 연구로는 방수층 하부에 단열재를 두는 녹화옥상시스템을 제안한 연구(김현수, 2003)⁵⁾와 방수층 상부에 단열재를 설치하고 토양층과 단열재 상부에 배수층을 설치한 것(two-layer system)과 설치하지 않은 것(one-layer system)으로 구분된 역지붕 녹화옥상 시스템(장대희외, 2005)⁶⁾을 들 수 있다.

건물의 단열·방수층과 관련없이 녹화부분만을 독립시킨 녹화시스템에 대한 연구로는 저토심 옥상 녹화를 위해 배수층을 최하부에 설치한 것과 최하부에서 5cm 높이에 위치한 것으로 구분하여 식생의 생육특성과 내건성 등을 고찰한 연구(김인혜 등, 2005)⁷⁾와 단위 모듈(500X500X100)로 제작된 함(box)이 방근, 배수, 토양 필터층을 일체화시킨 모듈형 옥상녹화시스템(장성완외, 2005)⁸⁾을 들 수 있다.

5) 김현수(2003), 한국형 Green Roof System 개발을 위한 Prototype 제안, 한국생태환경건축학회 논문집, No.3, Vol. 3, pp.3-11.

6) 장대희, 김현수, 이진호, 문수영(2005), 역지붕 녹화옥상시스템[KICT-GRS2004]의 우수유출 특성에 관한 실험적 연구, 한국생태환경건축학회 논문집, No.5, Vol. 2, pp.11-18.

7) 김인혜, 허무룡, 허근영(2005), 국내에 도입된 *Sedum album* L.의 생육 특성 및 저토심 옥상 녹화 시스템에 관한 연구, 한국조경학회지, No.33, Vol. 5, pp.69-82.

8) 장성완, 김동욱, 김동엽, 안원용, 한미라(2005), 모듈형 옥상녹화시스템을 이용한 옥상녹화에 관한 연구, 옥상녹화연구회, 추계학술논문 발표회 논문집.

2.2 도입식물에 관한 연구

옥상등의 평면이나 낮은 경사면에 도입되는 식물의 대표적인 것은 세덤류(*Sedum*)들이다. 특히 옥상녹화시스템이 저관리, 혹은 무관리, 경량형 녹화시스템(extensive green roof system)으로 개발방향이 이행되면서 세덤식물은 혹독한 환경에서 살 수 있는 식물의 대표주자로 각광을 받고 있다. 돌나물(*Sedum sarmentosum*)과 기린초(*Sedum kamtschaticum*), 흰꽃세덤(*Sedum album* L.)의 생육 특성을 인공 토양배지, 토심, 배수형태에 따라 고찰한 연구(허근영외, 2003)⁹⁾, 인공 토양별 적정 식물 선정과 천이가 일어나지 않은 토양 조건에 관한 연구(김현수, 2006)¹⁰⁾ 등이 있으며, 옥상 녹화시 도입 식물을 주변에서 이입되는 생물종을 분석하여 공통되는 종을 목표종으로 선정하는 방안에 대한 연구(최희선, 2004)¹¹⁾, 옥상 녹화후 식물 변화를 모니터링 한 연구(김현규, 2005)¹²⁾ 등이 있다.

벽면에 도입 가능한 식생으로는 등반형, 하수형 등의 덩굴 식물이 고려되는데 서울시내 벽면에 식재, 혹은 자생하는 식물을 조사한 연구(이숙미외, 1994)¹³⁾, 남부지역의 특성을 고려하여 상록벽면녹화에 송악류(*Hedera* spp.)와 줄사철(*Euonymus radicans*)의 이용을 제안한 연구(강호철외, 2005)¹⁴⁾ 등을 들 수 있다.

2.3 인공 토양에 관한 연구

인공지반 상부에 이용되는 인공토양이 갖추어야 할 최우선 조건은 경량화이다. 경량화와 아울러 식물 생장을 위해서는 보수성, 보비력이 높아야 하고 동시에 배수성, 통기성이 우수해야 하는 상반된 기능이 요구된다. 서로 반대되는 입장에서의 적절한 절충선을 찾는 것이 지금까지 인공토양에 대한 연구라 요약할 수 있다. 심경구의(1999)¹⁵⁾는 소성점토 다공체와 코코넛 피트를 혼합하여 헤데라(*Hedera* L.)를 식재하여 적합성 여부를 판단하였으며, 허근영외(2000)¹⁶⁾는 펠라이트, 다공질 유리 파쇄물, 수피, 노지 토양 등의 단용, 또는 혼합하여 인공토양을 조

성하고 쥐똥나무(*Ligustrum obtusifolium*)와 라일락(*Syringa vulgaris*)을 식재하여 적합성 여부를 판단하였다. 안원용외(2001)¹⁷⁾는 S사의 파라소 토양으로 시공된 지역 14곳을 선정하여 인공토양의 이화학적 특성이 어떻게 변화하였는지를 고찰하였다. 허근영외(2003a, 2003b)¹⁸⁾¹⁹⁾, 김인혜외(2005)²⁰⁾는 다공질 유리 파쇄물, 수피, 노지 토양 등의 단용, 또는 혼합한 인공토양에 따른 돌나물(*Sedum sarmentosum*), 기린초(*Sedum kamtschaticum*), 흰꽃세덤(*Sedum album*)의 생육특성 차이를 고찰하였다. 장성완외(2005)²¹⁾는 펠라이트, 버미큘라이트, 피트모스를 혼합한 토양에 자생초화의 생육 상태를 고찰하였고, 김현수외(2006)²²⁾는 유기질 토양과 무기질 토양으로 5가지 조합의 인공토양을 만들고 옥상 녹화에 적용 가능한 식물을 식재하여 식생별로 적합한 토양과 천이가 잘 일어나지 않는 토양을 찾고자 하였다.

3. 선태식물 도입의 이론적 고찰

3.1 선태식물(Bryophyte)

선태식물은 자연 천이의 초기 단계에 속하는 식물로 가장 척박한 곳에서 성장하는 식물로 지구역사에서 4억 5천만 년 전 고생대 실루리아기(Silurian period)에 등장한 육지 최초의 식물이다. 바다를 제외한 육지에 아무런 생명체가 존재하지 않던 시기에 등장한 선태식물은 무기물의 환경이 지금처럼 생명의 공간으로 전환됨에 있어 중요한 동인(動因)이 되었다²³⁾.

선태식물은 전 세계적으로 20,000여종, 국내에 700 ~ 2,000여종으로 서식 장소는 극지방에서부터 적도지방에 이르기까지 광범위하게 분포하는 것으로 알려져 있다. 선태식물문(蘚苔植物門)은 선류(蘚類/mosses, Musci), 태류(苔類/liverworts, Hepaticae), 각태류(角苔類/hornworts, Anthocerotae) 등 세 개의 강(綱, Class)으로 구분된다. 선류에는 솔이끼(*Polytricum* spp.), 태류에는 우산이끼(*Mchantia* spp)가 대표적이다. 선태식물은 은화식물(cryptogam)로 포자(spore)로 번식하며, 유성세대인 배우체세대(2n, gametophyte)와 무성세대인 포자체세대(n, sporophyte)가 반복되는 세대교번(alteration of generations)을 한다²⁴⁾. 고등식물인 관속 식물(vascular plant)과 구별되는 차이점은 뿌리와 체내에 영양분이나 수분을 이동시키는 통로 조직이 없다는 점이다. 따라서 선태식물은

9) 허근영, 김인혜, 강호철(2003), 저토심 옥상녹화 시스템에서 돌나물(*Sedum sarmentosum*)의 생육에 대한 인공배지의 종류, 토심 그리고 배수 형태의 효과, 한국조경학회지, No.31, Vol. 2, pp.102-112.
 10) 김현수, 오충현, 신정섭, 장대회(2006), Extensive Green Roof System에 적합한 인공토양 및 식물 선정을 위한 실험연구, 한국생태환경건축학회 논문집, No.6, Vol. 2, pp.43-46.
 11) 최희선, 김귀곤, 홍수영(2004), 도시생태네트워크 측면에서의 옥상녹화입지를 위한 목표종 선정에 관한 연구, 한국조경학회지, No.32, Vol. 3, pp.18-31.
 12) 김현규, 노태성, 신승훈(2005), 옥상녹화 후 모니터링을 통한 식물상의 변화에 관한 연구, 한국생태환경건축학회 논문집, No.5, pp. 55-62.
 13) 이숙미, 심우경(1994), 도시의 벽면녹화를 위한 벽면식생 조사연구, 한국조경학회지, No.22 Vol. 1, pp.121-134.
 14) 강호철, 김광호, 허근영(2005), 남부지역의 특성을 고려한 상록벽면 녹화 공법 개발, 한국조경학회지, No.33, Vol. 2, pp.32-47.
 15) 심경구, 허근영, 강호철(1999), 소성 점토다공체 및 코코넛 피트를 이용한 인공지반용 혼합배지의 개발, 한국조경학회지, No.27, Vol. 3, pp.109-113.
 16) 허근영, 심경구(2000), 인공지반의 녹화를 위해서 단용 또는 노지토양과 혼합하여 이용되는 인공토양의 특성, 한국조경학회지, No.28, Vol. 2, pp.28-38.

17) 안원용, 김동엽(2001), 옥상녹화 후 인공토양의 이화학적 특성 변화, 한국조경학회지, No.28, Vol. 6, pp.77-83.
 18) 허근영, 김인혜, 강호철(2003a), 전개서, pp.102-112.
 19) 허근영, 김인혜, 강호철(2003b), 저토심 옥상녹화 시스템에서 기린초의 생육에 대한 인공배지의 종류, 토심 그리고 배수 형태의 효과, 한국조경학회지, No.31, Vol. 4, pp.90-100.
 20) 김인혜, 허무룡, 허근영(2005), 전개서, pp.69-82.
 21) 장성완, 김동욱, 김동엽, 안원용, 한미라(2005), 전개서.
 22) 김현수, 오충현, 신정섭, 장대회(2006), 전개서, pp.43-46.
 23) 김용규(2006), 이끼, 그 생명의 미학, LAnD: 조경·미학·디자인, pp.200-209.
 24) 岩月善之助, 水谷正美腹 共著, 部新佐監修(1994), 原色日本蘚苔類圖鑑, 保育社, pp.1-13.

수분과 양분을 몸에서 직접 흡수한다. 이는 선태식물이 잎과 줄기의 구분이 모호한 세포덩어리로 구성되고 표면에 큐티클층이 없기 때문이다. 이러한 형태학적 유사성으로 선태식물이 바다의 조류(藻類, algae)에서 진화했을 거란 설이 현재까지 가장 설득력 있는 학설이다. 선태식물의 이러한 특징을 이용하여 대기오염, 중금속 오염 및 흡착 등 지표식물로 이용하는 많은 연구가 수행되고 있다.

선태식물의 뿌리는 가근(假根, rhizoid)으로 부착기능이 주이며, 도관조직이 없는 세포로만 이루어져 있기에 흡수된 수분과 양분을 상부에 전달하는 역할을 수행하지는 않는다. 이러한 특징이 식생기반 없이도 햇빛과 강우가 닿는 곳이면 바위나 콘크리트 등에서 선태식물이 생육할 수 있는 것이며, 무기재료 일색의 도시에 적용 가능성을 기대케 하는 요소이다.



그림 2. 일상속의 이끼 [출처: 김용규 촬영]

3.2 선태식물의 건조 내성(desiccation - tolerance)

바다의 조류(algae)에서 기원된 선태식물이 육지와 같이 건조한 환경에 적응하여 살아갈 수 있다는 것에 많은 분야에서 관심을 보인다. 관심의 목적은 육상 식물의 진화 과정에 대한 이해 목적 뿐 만 아니라 건조를 견디는 세포차원의 반응이나 기작(mechanism)을 이해함으로써 식량자원의 생산성 증대, 의약품, 농업용 등으로의 응용을 위해서 이다. 건조 내성(desiccation - tolerance)은 건조한 공기 상태에서부터 체내의 세포가 훼손되지 않고 다시 수분이 가해졌을 때 재생하는 세포의 능력²⁶⁾을 나타낸다.

표 1. 건조후 *Polytricum formosum* 앞의 함수량

Sample	Water content (% of total weight)
Freshly collected shoots	56.2 ± 2.0
Naturally desiccated shoots	7.5 ± 0.4
0.5-h rehydrated shoots	45.1 ± 1.2
1-h rehydrated shoots	51.2 ± 1.7
2-h rehydrated shoot	54.3 ± 2.2
12-h rehydrated shoots	59.6 ± 0.8
24-h rehydrated shoots	59.5 ± 0.6

[출처: Pressel et al.(2006), p.69에서 인용]

한발(旱魃, drought)이 생명체가 이용할 물이 적은 것을 지칭한다면 건조는 생명체 세포내에 함수량이 적은 것을 가리킨다. 건조(desiccation)에 대한 양적인 정의는 자기 건조량(dry weight)의 5 -10% 정도 수분이 세포에 남아 있는 상태, 20℃에서 50%의 상대 습도일 때의 공기 건조 상태, 수분 포텐셜(water potential)이 -100MPa일 때이다²⁷⁾. 건조 내성은 세포내에 액체라고는 거의 남아있지 않은 상태에서 수분이 다시 공급되면 정상적인 물질대사



그림 1. 무기 환경의 자연화과정[출처: 김용규 촬영]

선태식물이 무기 환경에 정착되면 미생물, 동물, 곤충류의 먹이와 보금자리를 제공하는 서식지가 될 뿐 아니라 바람에 비산된 종자가 정착할 수 있는 미세 환경을 구비하게 되어 새로운 생태계를 형성시킨다. 이러한 선태식물의 생태계 파동효과(ripple effect)는 적용 가능성을 주목케 하는 이유이다²⁵⁾.

25) US Dept. of Interior National biological Service(1995), Our Living resources, Washington D.C., pp.197-200.

26) Oliver, M. J., J. Velten, and A. J. Wood(2000), Bryophyte as experimental models for the study of environmental stress tolerance: *Tortula ruralis* an desiccation-tolerance in mosses, Plant Ecology, No. 151, p. 74. Bewley, J. D.(1979), Physiological aspects of desiccation - tolerance, Ann. Rev. Plant Physiol. No. 30, pp.195 - 238. 재인용
27) Alpert, P.(2005), The Limits and Frontiers of Desiccation - Tolerant Life, Integr. Comp. Biol., No. 45, p.686.

를 회복하고 성장을 계속할 때를 가리킨다²⁸⁾.

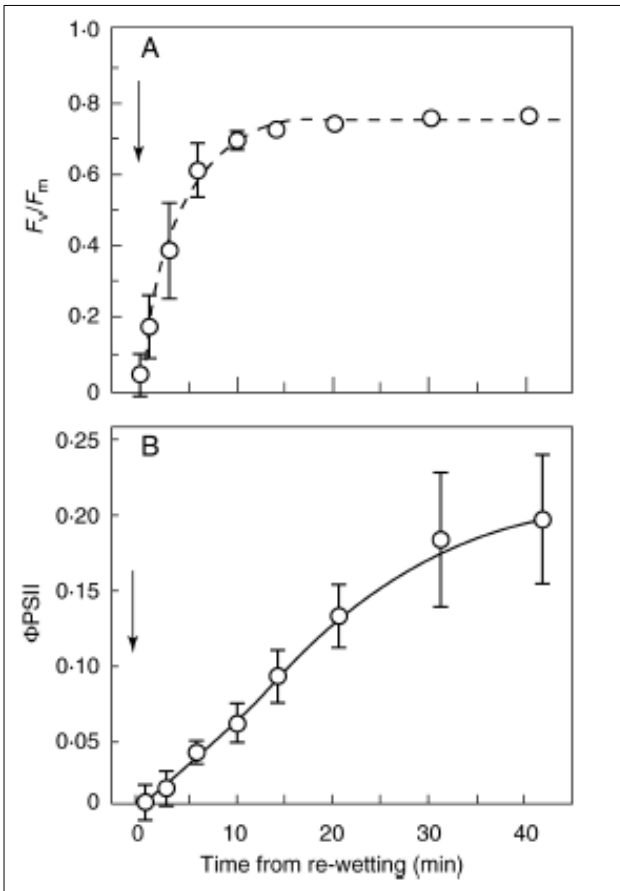


그림 3. 건조 후 수분을 다시 가했을 때 선태식물 *Polytrichum formosum* 앞의 chlorophyll-fluorescence 측정 [출처: Proctor, M.(2007)에서 인용]

Proctor(2007)는 선태식물 *polytrichum formosum*을 이용하여 이를 건조시킨 후 수분을 다시 가했을 때 chlorophyll fluorescence의 회복을 측정하였더니 10분 후에 건조되지 않았을 때의 80%를 회복하였고, 1시간 안에 96%를 회복된 것을 관측하였다. Pressel et al.(2005)는 선태식물을 건조 상태에 노출시킨 후 수분을 재공급하여 함유량을 측정하였는데 2시간 전후로 건조되지 않은 상태에 거의 다다른 것으로 나타났다. 선태식물이 건조 시간이 6개월이나 1년이 지난 후에도 수분이 공급되면 다시 광합성과 물질 대사를 재개할 수 있는 것은 관속식물(vascular plant)과 달리 외부에서 체내 세포로 직접 수분과 양분을 공급받고 세포에 저장하였다가 외부 환경이 건조해지면 세포내 수분을 바깥으로 즉시 내보내 내·외부의 수분 포텐셜을 평형에 이르게 하는 변수성 식물(poikilohydric plant)이기 때문이다. 선태식물은 관속식물이 지닌 수관과 체관(xylem and phloem), 통기성의 광합

성 조직, 큐티클층(cuticle), 기공(stomata) 등의 수분을 조절할 수 있는 기관이 부재하며, 외부와의 빠른 수분 평형을 통해 생존한다. 대부분의 작물용 식물들은 수분 포텐셜이 -1.5 ~ -3 MPa에서 생존할 수 있음에 비해 선태식물은 -20 ~ -40MPa에서도 생존이 가능하며, 사막에 서식하는 *Tortula caninervis*는 -540MPa에서도 생존하고 심지어 6년간 건조에 노출되었다가도 건조 내성을 회복하고 성장을 지속하기도 한다²⁹⁾.

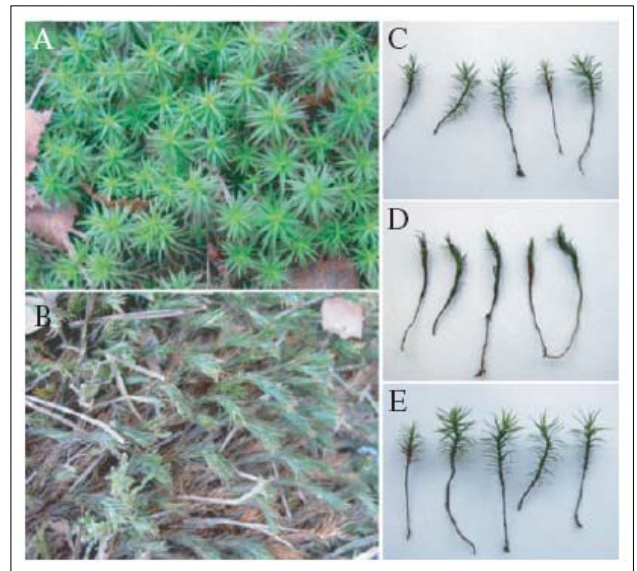


그림 4. *Polytrichum formosum*의 건조 상태와 수분 재공급 상태의 비교. (a)는 자연에서 습윤 상태 모습, (b) 자연에서 건조 상태 모습, (c)는 자연에서 습윤 상태모습, (d) 건조 상태 모습, (e) 수분 재공급후 5분 후 모습 [출처: Pressel et al.(2005)에서 인용]

선태식물은 햇빛이 비치는 조건에서는 건조되어 물질 대사를 활성화시키지 않다가 비가 오거나 구름이 낀 기상 조건, 즉 맑은 날 광도의 약 20%이하 상태에서 광합성을 행하는 것으로 알려져 있다³⁰⁾. 선태식물은 햇빛이 강해질 때 수분을 세포 밖으로 내보냄으로서 에너지 획득보다는 광으로부터 보호(photoprotection)를 우선하는 전략을 택하는 것으로 보인다.

4. 선태식물의 환경적 효과 고찰 사례

일본에서는 2002년을 전후로, 국내에서는 2004년을 전후로 이끼를 이용한 인공지반 녹화가 시도되었고 환경적 효과는 온도 저감 효과, 절전 효과, 우수 유출 지연 효과 등에 대한 실험이 고찰되었다.

28) Proctor, M. C. F., R. Ligrone, and J. G. Duckett(2007), Desiccation Tolerance in the Moss *Polytrichum formosum*: Physiological and Fine-structural Changes during desiccation and Recovery, Annals of Botany, No.99, p.75.

29) Oliver M. J. , J. Velten, and B. D. Mishler(2005), Desiccation Tolerance in Bryophyte: A Reflection of the Primitive Strategy for Plant Survival in Dehydrating Habitats?, Integr. Comp. Biol., No. 45, p.789.
30) Marschall M. Michael C. F. Proctor(2004), Are Bryophytes shade Plants? Photosynthetic Light responses and Proportions of Chlorophyll a, Chlorophyll b and Total Carotenoids, Annals of Botany, No.94, pp.603.

4.1 무기질 표면 온도 변화 고찰

이건호(2005)는 콘크리트 면을 대조구로 하여 이끼 매트 를 설치하고 표면온도변화를 측정 한 결과 콘크리트면의 온도가 57℃까지 지속적으로 상승한 반면, 4mm 및 10mm 이끼매트는 약 1시간 30분 후에 40℃ 내외에서 안정화되 었고, 인공 일사 제어시 4시간 경과 후 콘크리트면은 약 30℃ 정도 온도가 떨어졌고, 이끼매트는 약 17~20K의 온도하강이 관측된 것으로 보고하였다³¹⁾.

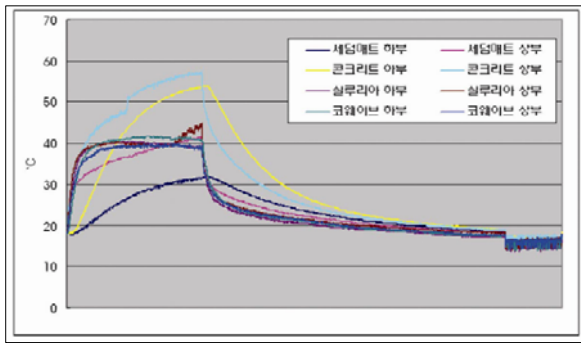


그림 5. 콘크리트상부 이끼매트 설치 후 온도변화
[출처: 이진호(2005)에서 인용]

澤木昌典 등(1998)은 서리이끼(*Rhacomitrium canescens*) 를 이용하여 기상완화 효과를 확인하기 위해 3월 6일(기 온 11~12℃)과 5월 20일(기온 27~28℃) 등 두 차례에 걸쳐 철판과 이끼층의 온도차를 측정 한 결과, 각각 약 1.9℃, 약 16℃의 철판 온도 상승 억제 효과를 관측하였 다³²⁾. (財)日本建材試験센터(2006)에서는 겨울철의 이끼 매트의 보온 효과를 고찰한 결과 8 ~ 10℃ 정도의 보온 효과를 지니는 것으로 관측되었다³³⁾. 이외에도 이끼 매트 의 여름철 온도 저감 및 겨울철 보온 효과에 대한 관측 기록은 비교적 많은 연구가 진행되고 있다. 일본 카나가 와현(神奈川県 海老名市) 축산기술센터(2006)³⁴⁾에서는 이끼매트를 설치한 곳과 그렇지 않은 곳의 폐지 축사 지붕 과 축사 실내의 온도변화를 8월 25일부터 10월 3일까지 관측하였다. 그 결과 지붕 표면에서는 12.2℃, 천정에서는 9.5℃, 실내온도는 1.2℃ 저하되는 것으로 관측되었다.

4.2 선태식물의 절전효과

日本 스미다 구립 식물학습원(墨田区立緑と花の学習園)의 관리사무소 지붕에 이끼 매트를 2002년에 설치한 후 전기사용량을 전년과 비교해 본 결과, 2000년과 2001년에 비해 매월 500~1,000엔 정도 절감효과가 있는 것으로 나타났³⁵⁾.

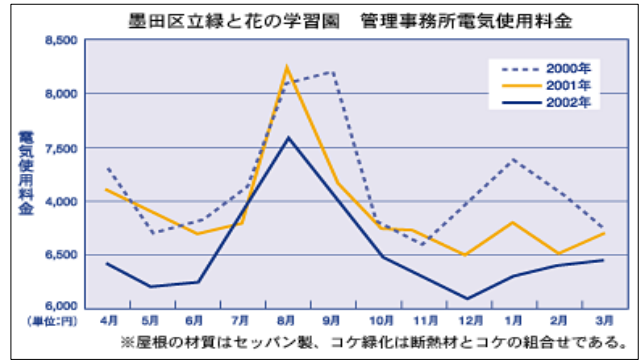


그림 6. 일본 스미다 구립 식물학습원 관리사무소 전기사용요금
[출처: <http://www.city.sumida.lg.jp>]

4.3 선태식물의 보수성과 배출지연 효과

와카야마 대학(和歌山大學)시스템공학부 환경시스템학과 에서 두께 2cm 정도로 성장한 조밀한 서리이끼 매트에 20 분간 100mm/h 강도의 강우를 주었을 때 저수량과 배출지 연효과를 계산해 보니 저수량은 10.3 l/m²로 관측되었 다³⁶⁾. 이는 실험 전, 이끼가 건조하여 생긴 공간이 이끼 가 물을 흡수함으로써 체적이 늘어나 물로 채워져 보수 력이 높아진 것으로 사료된다. 장대회 등(2006)³⁷⁾은 콘크 리트와 발포세라믹 10cm위에 이끼 혼합액을 취부한 것과 우수 지연 효과를 고찰한 결과, 강우량의 50%정도를 유 출시키고 강우 발생후 75 - 90분 후부터 우수 유출이 시 작되는 것으로 나타나 초기 우수 유출 지연효과가 있음 을 고찰하고 있다.

5. 선태식물의 환경적 적용 사례

인공지반의 평면, 경사면 수직면에 선태식물을 환경적으 로 적용한 예는 일본과 우리나라가 거의 전부라고 할 수 있다. 새로운 제품들을 시도하는 초기 단계로 일본과 국 내에서 시행착오를 겪고 있으나 관심의 정도가 높아지고 있어 멀지 않은 시간에 기존의 녹화방식에 버금가는 기 술적 발전이 기대된다. 본 연구에서는 일본과 국내에 적 용된 사례를 사진자료를 중심으로 소개한다.

5.1 지붕면 적용 사례

선태식물에 대한 기초 연구가 충분한 일본은 (有)모스 캐ッチ시스템 基礎研究所가 선태식물의 환경적 이용 을 위한 신제품을 출시하였다. 그림 7은 (株)모스캐치 시스템서비스에서 시공한 사례로 샌드위치 지붕 패널의 골에 스티로폼을 끼워 넣고 평탄화 한 후, 3mm 두께의 시트인 논퓏 시를보드(ノソフォッシルボード)를 부 착시키고 주기적으로 관수하였다.

31) 이진호(2005), 도시인공지반의 생태적 복원을 위한 기술개발에 대한 심포지움, 한국조경학회 산업기술연구회 학회지, pp.33~42
32) 澤木昌典 등(1998), 植物によるCO2固定と環境負荷低減に關する研究 : スナゴケなどによる環境負荷低減. 21世期學會誌
33) http://www2.big.or.jp/~moscatch/info.html#060907_02
34) www.agri.pref.kanagawa.jp/chikusanken/jvouho/200607/jvouho/2006
35) <http://www.city.sumida.lg.jp>

36) (株)インタラクシオン/環境緑化新聞編(2003), Landscape & Greenary, Eco Green Tech catalog.
37) 장대회, 김현수, 이진호, 문수영(2006), Green Roof System의 다양한 성능 추구를 위한 공법 제시 및 성능 비교 실험 연구, 한국생태 환경건축학회 논문집, No.6, Vol. 2, pp.59-66.



그림 7. 일본 스미다구 자연학습원 지붕
[출처: 김용규 촬영]



그림 9. 인천박문여고 옥상 시공사례
[출처: 김용규 촬영]

그림 8은 모스블로 환경기술工業會가 가와가나현(神奈川県 海老名市) 축산기술센터 돼지축사 지붕에 패널식의 모스블로우 moss blow(모스블로우) 제품을 적용한 사례이다. 금속망 사이에 보습재를 넣고 성장된 이끼를 채워 설치한 사례이다.



그림 8. 神奈川県海老名市 돼지 축사 지붕
[출처: <http://www.mossblow.com/>]

국내에서는 I사가 일본에서 도입된 기술을 기반으로 2004년부터 적용되기 시작하였다. 그림 9는 2004년 인천 박문여고 옥상을 두께 5mm의 이끼 시트로 시공한 사례이다. 시트는 강우에 의한 충격을 완화하기 위해 요철이 있도록 제작되었으며 실리콘을 이용하여 접착하였다. 관수 장치는 설치하지 않았다. 접착제 내구성, 수축·팽창, 보습능력 저하 등의 문제점이 노출되었다.

5.2 수직면 적용 사례

그림 10은 (株)모스캐치시스템山形가 동경시내 프라다(PRADA) 사옥의 옹벽면에 보드(board)형태의 모스보드(모스보드)를 시공한 사례이다. 이끼를 완전히 성장시킨 상태로 시공되었고 앵커를 이용하여 고정시켰으며, 자동식 관수장치를 설치하였다. 단일종의 이끼만을 사용하다 보니 양지, 반음지, 영구 음영지역 등 미세 환경 차이에 따라 생장이 완료된 이끼가 적용하는데 문제점을 드러냈다.



그림 10. 동경 프라다 사옥 옹벽면
[출처: 김용규 촬영]

그림 11은 Moss World Inc.에서 교토의 개인주택 벽면에 10mm 두께의 두꺼운 시트로 제작한 모스인티(モスインティ) 설치 예이다. 관수장치도 설치되어 있다.



그림 11. 교토 개인주택 벽면에 설치한 사례

[출처: <http://www2.big.or.jp/~moscatch/product/photo/photo23.html>]

그림 12는 2004년에 곤지암CC 주차장 옹벽 상단에 실루리안 시트를 시공한 첫 사례이다. 일본에서 도입된 기술로 제작된 첫 제품으로 3mm 두께의 시트를 무초산성 실리콘으로 부착하였고 관수는 비정기적으로 행하였다. 접착제의 내구성, 시트의 수축·팽창, 보습능력 저하 등의 문제점이 노출되었다.



그림 12. 곤지암CC 주차장 옹벽 상단

[출처: 김용규 촬영]

그림 13은 2005년 서울 광진구의 원룸 주차타워 벽면을 두께 10mm의 시트로 시공한 사례이다. 접착제는 전용 접착제를 개발하여 사용하였고 일정 간격으로 타격앵커를 이용 고정하였다. 최상단에 관수시설을 하였으나 관리상 문제로 관수가 시행되지 않고 있다. 향(向)에 따른 이끼의 생육 차이가 크게 나고, 접착제 전면 도포, 수직 상태

에서의 시공의 어려움, 시트 규격의 불일치 등 시공상 불편함이 드러났다.



그림 13. 서울 광진구 원룸 주차장 벽면

[출처: 김용규 촬영]



그림 14. 서울 청암동 아파트 옹벽

[출처: 김용규 촬영]

그림 14는 2005년에 서울 청암동 아파트 옹벽에 설치한 예이다. 10mm 두께의 두꺼운 시트 형태의 제품을 전용 접착제와 앵커를 이용해 고정하였다. 상단에 관수 장치를 설치하여 주기적으로 관수가 시행되었다.



그림 15. 일본 아이치 박람회
[출처: 허영진 촬영]

그림 15는 2005년 아이치박람회 전시장에 연출된 수직면 녹화의 사례로 도자기재질의 다공질 세라믹으로 기판을 완성하고 성장된 이끼를 고정시킨 제품이다. 관수장치가 내부에 설치되어 있다.



그림 16. 구로고등학교 건물 외벽
[출처: 장혜숙 촬영]

그림 16은 2006년 서울 구로고등학교 건물 외벽, 그림 17은 성남시 금광동 아파트 응벽에 설치한 예이다. 10mm 두께의 두꺼운 시트 형태의 제품을 전용 접착제를 이용하여 시공하였고 상단부에 관수장치를 설치, 주기적인 관수를 행하였다.



그림 17. 성남 금광동 아파트 응벽
[출처: 장혜숙 촬영]

5.3 수평면 적용 사례

그림 18은 개인 주택에 이끼 정원을 조성한 사례이다. 쇠석기반위에 이끼 혼합액을 취부하여 완료하였고 바닥에 관수 장치가 설치되어 주기적으로 관수되고 있다.



그림 18. 남양주시 개인주택 이끼 정원
[출처: 김용규 촬영]

6. 결 론

생명체의 신진대사는 세포내 원형질(hydrated protoplasm)에서 물을 매개로 일어난다. 육지에 출현한 초기 식물은 건조한 대기조건 하에서 신진대사가 억제되는데 이 과정에서 생존을 위해 어떤 반응을 선택했느냐는 생명 진화분야에서 중요한 주제이다. 건조에 대한 식물 반응은 선인장(cactus)처럼 건조에 저항하는 형(desiccation-resistance), 해바라기(sunflower)와 같이 건조를 회피하는 형(desiccation-avoidance), 선태식물(moss)과 같이 건조를 견디어 내는 형(desiccation-tolerance) 등 3가지로 구분된다³⁸⁾.

38) Alpert, P.(2000), the cactus, the sunflower, and the moss, Plant Ecology, No. 151, pp.1-4.

지금까지가 건조 저항형의 선인장과 같은 식생을 이용하는 접근이었다면 선태식물의 이용은 단순히 새로운 식물종 1종을 추가하는 것에 그치지 않고 건조 내성형이라는 새로운 식물형을 이용하는 접근이다. 이는 수억 년 전부터 자연이 보여준 것을 재현하는 일이다.

선태식물에 대한 이론적 고찰과 환경적 효과에 대한 데이터 수집, 일본과 한국에서의 응용사례 수집을 통해 선태식물의 이용 가능성을 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 선태식물이 지닌 건조 내성과 변수성은 무기질 환경에서 생존을 가능케 하는 기본적인 속성이다.
2. 선태식물의 적용에 따른 환경적 효과에 대한 단편적인 연구 결과, 적용 사례들은 선태식물이 인공구조물의 녹화 소재로써 사용 가능성을 보여주는 사례들이다.

참고문헌

1. 서울시정개발연구원(2006), 서울시 온실가스 저감 목표 수립 및 이행 계획 평가, p.56
2. 서울특별시(2000), 도시생태개념의 도시계획에의 적용을 위한 서울시 바이오톱 현황조사 및 생태도시 조성 지침 수립 - 1차년도 보고서, pp.63-71.
3. 서울그린트러스트(2005), 서울 그린비전 2020 실천전략 - 그린을 통한 도시환경 혁신 요약보고서, pp.17-21.
4. 서울시정개발연구원(2001), 서울시 도시 생태계의 장기모니터링 방안 연구, p.11. Sukopp, H.(1998), Scientific and practical Aspects. *In Urban Ecology*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp.3-16.에서 재인용
5. 김현수(2003), 한국형 Green Roof System 개발을 위한 Prototype 제안, 한국생태환경건축학회 논문집, No.3, Vol. 3, pp.3-11.
6. 장대회, 김현수, 이건호, 문수영(2005), 역지붕 녹화옥상시스템 [KICT-GRS2004]의 우수유출 특성에 관한 실험적 연구, 한국생태환경건축학회 논문집, No.5, Vol. 2, pp.11-18.
7. 김인혜, 허무룡, 허근영(2005), 국내에 도입된 *Sedum album* L.의 생육 특성 및 저토심 옥상 녹화 시스템에 관한 연구, 한국조경학회지, No.33, Vol. 5, pp.69-82.
8. 장성완, 김동욱, 김동엽, 안원용, 한미라(2005), 모듈형 옥상녹화시스템을 이용한 옥상녹화에 관한 연구, 옥상녹화연구회, 추계학술논문 발표회 논문집.
9. 허근영, 김인혜, 강호철(2003), 저토심 옥상녹화 시스템에서 돌나물 (*Sedum sarmentosum*)의 생육에 대한 인공배지의 종류, 토심 그리고 배수 형태의 효과, 한국조경학회지, No.31, Vol. 2, pp.102-112.
10. 김현수, 오충현, 신경섭, 장대회(2006), Extensive Green Roof System에 적합한 인공토양 및 식물 선정을 위한 실험연구, 한국생태환경건축학회 논문집, No.6, Vol. 2, pp.43-46.
11. 최희선, 김귀곤, 홍수영(2004), 도시생태네트워크 측면에서의 옥상녹화입지를 위한 목표종 선정에 관한 연구, 한국조경학회지, No.32, Vol. 3, pp.18-31.
12. 김현규, 노태성, 신승훈(2005), 옥상녹화 후 모니터링을 통한 식물상의 변화에 관한 연구, 한국생태환경건축학회 논문집, No.5, pp. 55-62.
13. 이숙미, 심우경(1994), 도시의 벽면녹화를 위한 벽면식생 조사연구, 한국조경학회지, No.22 Vol. 1, pp.121-134.
14. 강호철, 김광호, 허근영(2005), 남부지역의 특성을 고려한 상록벽면 녹화 공법 개발, 한국조경학회지, No.33, Vol. 2, pp.32-47.
15. 심경규, 허근영, 강호철(1999), 소성 점토다공체 및 코코넛 피트를

이용한 인공지반용 혼합배지의 개발, 한국조경학회지, No.27, Vol. 3, pp.109-113.

16. 허근영, 심경규(2000), 인공지반의 녹화를 위해서 단용 또는 노지토양과 혼합하여 이용되는 인공토양의 특성, 한국조경학회지, No.28, Vol. 2, pp.28-38.
17. 안원용, 김동엽(2001), 옥상녹화 후 인공토양의 이화학적 특성 변화, 한국조경학회지, No.28, Vol. 6, pp.77-83.
18. 허근영, 김인혜, 강호철(2003a), 전개서, pp.102-112.
19. 허근영, 김인혜, 강호철(2003b), 저토심 옥상녹화 시스템에서 기린초의 생육에 대한 인공배지의 종류, 토심 그리고 배수 형태의 효과, 한국조경학회지, No.31, Vol. 4, pp.90-100.
20. 김인혜, 허무룡, 허근영(2005), 전개서, pp.69-82.
21. 장성완, 김동욱, 김동엽, 안원용, 한미라(2005), 전개서.
22. 김현수, 오충현, 신경섭, 장대회(2006), 전개서, pp.43-46.
23. 김용규(2006), *이끼, 그 생명의 미학*, LANd: 조경·미학·디자인, pp.200-209.
24. 岩月善之助, 水谷正美腹 共著, 部新佐監修(1994), 原色日本蘚苔類圖鑑, 保育社, pp.1-13.
25. US Dept. of Interior National biological Service(1995), *Our Living resources*, Washington D.C., pp.197-200.
26. Oliver, M. J., J. Velten, and A. J. Wood(2000), Bryophyte as experimental models for the study of environmental stress tolerance: *Tortula ruralis* an desiccation=tolerance in mosses, *Plant Ecology*, No. 151, p. 74. Bewley, J. D.(1979), Physiological aspects of desiccation - tolerance, *Ann. Rev. Plant Physiol.* No. 30, pp.195 - 238. 재인용
27. Alpert, P.(2005), *The Limits and Frontiers of Desiccation - Tolerant Life*, *Integr. Comp. Biol.*, No. 45, p.686.
28. Proctor, M. C. F., R. Ligrone, and J. G. Duckett(2007), Desiccation Tolerance in the Moss *Polytrichum formosum*: Physiological and Fine-structural Changes during desiccation and Recovery, *Annals of Botany*, No.99, p.75.
29. Oliver M. J. , J. Velten, and B. D. Mishler(2005), Desiccation Tolerance in Bryophyte: A Reflection of the Primitive Strategy for Plant Survival in Dehydrating Habitats?, *Integr. Comp. Biol.*, No. 45, p.789.
30. Marschall M. Michael C. F. Proctor(2004), Are Bryophytes shade Plants? Photosynthetic Light responses and Proportions of Chlorophyll a, Chlorophyll b and Total Carotenoids, *Annals of Botany*, No.94, p.603.
31. 이건호(2005), 도시인공지반의 생태적 복원을 위한 기술개발에 대한 심포지움, 한국조경학회 산업기술연구회 학회지, pp.33~42.
32. 澤木昌典他(1998), 植物によるCO₂固定と環境負荷低減に関する研究 : スナゴケなどによる環境負荷低減. 21世期學會誌
33. http://www2.big.or.jp/~moscatch/info.html#060907_02
34. www.agri.pref.kanagawajp/chikusanken/jyouchu/200607/
35. (株)インタラクシオン/環境緑化新聞編(2003), *Landscape & Greenary, Eco Green Tech catalog*.
36. 장대회, 김현수, 이건호, 문수영(2006), Green Roof System의 다양한 성능 추구를 위한 공법 제시 및 성능 비교 실험 연구, 한국생태환경건축학회 논문집, No.6, Vol. 2, pp.59-66.
37. Alpert, P.(2000), the cactus, the sunflower, and the moss, *Plant Ecology*, No. 151, pp.1-4.