

식물을 이용한 실내공기질 개선효과

○ 송 정 은 | 한양대학교 건축환경공학과 공학박사
E-mail : jesong@hanyang.ac.kr

1. 서론

최근 건축자재와 건물의 가구 구성의 변화로 인하여 건축자재에서 수백 가지의 휘발성 유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs)이 발생하고 있다. 그 밖에도 이산화탄소(CO₂), 일산화탄소(CO), 라돈, 곰팡이, 미생물 등 건축물의 실내에는 다양한 종류의 오염원이 있다. 이 중에서 휘발성유기화합물의 발생은 ‘건물병증후군(Sick Building Syndrome, SBS)’을 일으키는 원인으로, 정부의 각 부처에서는 실내공기오염의 위험성을 인지하고 이를 줄이는 방안을 모색하고 있다. 실내의 공기오염을 줄이는 일반적인 방안으로 현재 많이 사용하고 있는 것은 공기조절장치를 사용하여 환기를 실시하거나, 실내의 마감재를 오염물질이 적게 발생하는 친환경적인 재료로 사용하는 방법 등이 있다. 공조장치를 이용한 기계 환기는 효과적이기는 하지만 운영비 등 비용적인 문제가 발생되어, 거주자들이 많이 사용하지 않는 실정이다. 최근, 이러한 문제점에 대한 보완책으로 비용도 절감하고 아름다움도 동시에 느낄 수 있는 공기정화식물의 사용이 증가되고 있다.

식물에 의한 실내공기환경 개선효과는 미 항공우주국 NASA에서 1980년부터 진행되어 식물이 밀폐된 공간에서 공기정화의 능력을 갖고 있다는 사실을 확인하였으며, NASA의 존 C. 스테니스 우주

센터에서는 밀폐된 실험실에서 식물이 폼알데하이드를 제거하는 효과가 있다는 연구결과를 발표했다(NASA, 1984). 또한 ‘바이오 홈’을 개발하여, 식물과 활성탄을 넣은 플랜트에 넣기 전과 후의 공기질을 파악하여, VOCs가 저감되는 결과를 얻었다. 최근 우리나라에서도 웰빙에 대한 관심이 높아지면서, 공기정화식물을 이용하여 깨끗한 공기를 만들고 주거환경을 향상시키고자하는 움직임이 나타나고 있다. 식물에 의한 공기정화 능력은 식물의 정화능력에 관한 연구(이진희, 2004), 실내환경 조절 효과에 대한 연구(최윤정 외 2005, 고유미 외 2007) 등이 진행되고 있는 실정이다. 또한 조경 분야에서도 실내공기조절을 위한 실내조경계획(장성수 외, 2001), 파키라가 실내 온습도 변화에 미치는 영향(손기철 외, 1998)등 이미 많은 연구가 이루어지고 있다.

본 연구는 식물을 실내에 배치하였을 경우에 실내 공기오염물질을 정화하는 기능이 있다는 것에 착안하여 실시되었다. 식물에 의한 자연정화 시스템의 이용은 에너지 절약 차원에서 뿐만 아니라 실내공간에서 생활하고 있는 거주자의 쾌적성을 창출하기 위하여 적극적인 개발이 필요하다. 이에 본 연구에서는 실내공기질 공정시험 방법에 의거하여 그 효과를 검증하고, 실제 공동주택에 식물을 적용한 결과를 제시하고자 한다. 식물을 이용한 실내공

간의 공기환경 개선효과를 검증하여 실용화하기 위한 실험으로 식물의 종류, 식재량과 식재배치, 계절별 생육조건에 따른 실내공간의 실내공기질 개선효과를 파악하였다. 또한 식물을 이용한 환기시스템을 개발하여 그 효과를 파악하였다. 본 연구에서는 다양한 실험을 통하여 결과를 얻었으며, 이를 SPSS를 이용한 통계분석으로 정리하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 실내공기오염

일반 공동주택에서 실내공간의 공기 질을 오염시킬 수 있는 주요 물질로는 미세먼지, CO, CO₂, 부유세균, 라돈 석면, 미생물, 곰팡이 등이 있으며, 특히 폼알데하이드와 휘발성유기화합물(VOCs)의 발생으로 인한 오염은 알레르기성 질환 및 호흡기 질환 등의 심각한 문제를 일으키고 있다.

특히 실내의 휘발성유기화합물의 오염문제가 심각하며, 주요 원인으로는 합성 건축자재와 접착제

사용의 증가 등이 있다. 휘발성유기화합물은 시공 후에 초기단계에서 많은 양이 방출되며, 시간이 지나면서 방출량이 점차 감소하게 되나, 거주자의 생활환경에서 발생하는 경우가 많아 지속적인 주의가 필요하다. 또한 새집증후군을 일으키는 폼알데하이드와 휘발성유기화합물의 경우에는 건축자재에서 방출되는 오염물질 농도에 의해 좌우되므로 친환경 자재의 사용이 중요하다. 현재 국내에서도 VOCs로 인한 오염을 저감시키려는 연구가 각 연구기관에서 활발히 이루어지고 있다. 국립환경과학원은 2005년 신축공동주택의 거주기간에 따른 실내 공기 오염도 변화추이 및 영향인자를 파악하기 위해, 신축공동주택 대상으로 입주 전과 후의 오염도를 조사하였다. 그 결과, 폼알데하이드에서 입주 전보다 입주 후의 농도가 증가하는 것을 파악하였으며, 그 원인으로 톨루엔은 생활용품보다 페인트 등 건축자재에서 발생하며, 폼알데하이드는 건축자재보다 가구 등 생활용품에서 주로 나오기 때문이라고 보고하였다. 이렇게 최근 신축 주택은 다양한 건설자재로부터 발생하는 오염물질로 인해 ‘새집증

표 1. 주요 실내오염물질 및 국내기준

오염물질	공동주택 기준 ¹⁾	다중이용시설 기준 ²⁾		주요 발생원	
	2006.12.30	2006.12.30	2007.9.14		
Form aldehyde	210 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	단열재, 연소, 접착제, 흡연, 소취제, 화장품, 가구	
휘발성유기화합물	Benzene	30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하	500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하	잡지, 신문, 흡연, 페인트, 접착제
	Toluene	1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$			페인트, 카펫, 바닥단열재, 잡지, 난방기구
	Ethyl benzene	360 $\mu\text{g}/\text{m}^3$			가구광택제, 왁스, 페인트, 전기용품
	Xylene	700 $\mu\text{g}/\text{m}^3$			페인트, 접착제, 카펫, 비닐타일
	Stylene	300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$			전기제품 및 화장품류
CO	-	10ppm	10ppm	가스레인지, 연료연소, 실내공간의 취사	
CO ₂	-	1000ppm	1000ppm	호흡, 연소과정, 취사	
Radon	-	4.0pCi/l	4.0pCi/l	콘크리트, 지하수, 화강암, 흙	
PM-10	-	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하	방향제, 도로	

*1) 신축 공동주택의 실내공기질 권고기준

*2) 다중이용시설 등의 실내공기질관리법의 실내공기질 유지기준

후군'을 일으키고 있으며, 이에 정부에서는 2004년 '다중이용시설 등의 실내공기질 관리법'을 제정함에 따라 거주자에게 쾌적한 공기환경을 제공하기 위해 다양한 방안을 시도하고 있다. 또한, 환경부는 새집증후군을 예방하기 위해 지난 2004년부터 시중에 유통 중인 전자재를 대상으로 오염물질 방출 시험을 해 기준을 초과한 제품은 오염물질방출 건축자재로 고시하고 있다.

2.2 휘발성 유기화합물(VOCs)

2.2.1 휘발성 유기화합물의 정의

휘발성유기화합물은 끓는점이 낮아서 대기 중으로 쉽게 증발되는 액체 또는 기체상 유기화합물의

총칭으로, 탄화수소의 관능기가 붙어져서 상온, 상압에서 쉽게 기화하며, 대기 중에서 광화학 반응을 일으켜 오존 등의 광화학 산화성 물질을 생성시켜 광화학 스모그를 유발하는 물질이다.

휘발성유기화합물의 유형은 세계보건기구(WHO)에서 휘발성유기화합물을 비등점에 따라 구분하며, 비등점이 0℃~(50~100℃)인 경우에는 고휘발성(VVOCs), (50~100℃)~(240~260℃)를 휘발성(VOCs), (240~260℃)~(380~400℃)를 반휘발성(SVOCs), 380℃이상 고체상태(POM: Particle-bound Organic Compounds)로 분류하고 탄화수소류 중 레이드증기압(RVP: Reid Vapor Pressure)이 10.3kPa (1.5psia) 이상인 석유화학제품, 유기용제 또는 기타 물질로 정의되고 있다. 주요 발생원으로는 액체연료, 파라핀 등 생활주변에서 흔하게 사용되는 유기

표 2. 국외의 휘발성 유기화합물(VOCs) 기준

오염물질	실내환경(Indoor Air)	작업환경 (Work space)
휘발성 유기 화합물 (VOCs)	Benzene	- 0.63ppm (EPA) 1 ppm (NIOSH-TWA) 1 ppm (OSHA-TWA) 10 ppm (ACGIH-TLV) 25 ppm (ACGIH-STEL)
	Toluene	260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (일본후생노동성) 2.1 ppm (European WHO) 100 ppm (NIOSH-TWA) 100 ppm (ACGIH-TLV) 150 ppm (ACGIH-STEL) 200 ppm (OSHA-TWA) 200 ppm (NIOSH-C)
	Ethyl benzene	3800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (일본후생노동성) 100 ppm (OSHA-TWA) 100 ppm (NIOSH-TWA) 100 ppm (ACGIH-TLV)
	Xylene	870 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (일본후생노동성) 100 ppm (OSHA-TWA) 100 ppm (NIOSH-TWA) 100 ppm (ACGIH-TLV) 150 ppm (ACGIH-STEL) 200 ppm (NIOSH-C)
	Form aldehyde	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (일본후생노동성) 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (핀란드환경부) -

* 1) EPA : Environmental Protection Agency
 2) NIOSH : National Institute for Occupational Safety and Health
 3) OSHA : Occupational Safety and Health Administration
 4) ACGIH : American Conference of Governmental Industrial Hygienists
 5) TWA : Time Weighted Average concentration
 6) TLV : Threshold Limit Value
 7) STEL : Short Term Exposure Limit
 8) C : Ceiling concentration

물질들이며, 실내에서는 건축재료, 세탁용제, 페인트, 살충제 등이 있다. 주로 호흡 및 피부를 통하여 인체에 흡수되며 급성중독일 경우 호흡곤란, 무기력, 두통, 구토 등을 초래하며 만성중독일 경우 혈액장애 등을 일으킬 수 있다.

2.2.2 휘발성 유기화합물의 국내·외 기준

다양한 건축자재의 사용으로 문제가 되고 있는 휘발성 유기화합물은 일반적인 오염물질과 구분하여 기준을 정하고 있다. 국내의 경우 실내공기오염 개별물질에 대한 구체적인 기준은 없으며, 외국의 경우 실내 환경과 작업환경을 구분하여 기준을 정하고 있다.

2.3 식물의 공기정화 기능

2.3.1 식물에 의한 공기정화 효과

환기는 실내공기를 개선시킬 수 있는 가장 쉽고 보편적인 방법이지만 대기오염이 심각한 도심 지역에서는 오염된 외기가 그대로 유입되는 문제가 있을 수 있고, 지하공간의 경우 환기장치가 깨끗하지 못하면 오히려 실내공기를 오염시킬 수도 있다. 인공적인 실내오염원의 기계 정화장치는 비용 면에서 실내공간이 대규모일 경우 경제적 부담이 될 수 있어 지속적인 실내공기정화의 효과를 기대하기 어렵다. 그러므로 환경적으로 안전하고 저렴하며 지속적인 생물학적 실내오염 제거기술이 모색될 필요가 있다. 현재 국내외의 생물학적 오염제거 방법으로는 미생물을 이용하는 방법이 보편적이며, 식물은 매우 효과적인 공기정화 장치로써 광합성 작용으로 공기 중의 이산화탄소를 흡수하여 결과물로서 산소를 만들어내는 자연 상태의 뛰어난 공기정화 장치일 뿐 아니라 공기를 만들어내는 생산자라 해도 과언이 아니다.

최근에는 건축물에 환경 친화적인 공간을 도입하여 자연과 인간의 유기적 연계를 가능케 하는 그린 빌딩디자인에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있는 가운데, 웰빙의 일환으로 공기정화식물이 많

이 이용되고 있다. 건축물 외부의 녹화가 대기질 개선 효과를 주었다면, 이제는 건축물의 실내에 적극적인 식물 도입을 통한 실내공기질의 개선이 필요할 때이다. 실내에서의 식물은 단순한 관상 목적의 차원을 넘어서 실내 환경의 개선 효과를 가지는데, 여기에는 대기 중의 오염물질의 감소, 온도와 수분의 조절, 오염공기의 정화여과, 소음 차단 등의 작용이 있다. 식물은 기공에서 이루어지는 가스교환 형식에 따라 가스 상의 실내오염물질을 식물 체내에 흡수한다. 또한 증산작용에 의하여 고온의 실내 온도를 저하시키고, 적정온도 이하에서는 식물체내의 열을 외기로 전달하여 실온을 상승시키는 등 실내 환경의 개선에 도움을 준다. 이와 같이 식물에 의한 자연정화 시스템의 이용은 에너지 절약 차원에서 뿐만 아니라 실내 공간에서 생활하고 있는 거주자의 쾌적성을 증대시키기 위하여 필요하다.

2.3.2 식물의 공기정화 연구의 국내외 사례

1980년 초 NASA에서는 달 기지화 계획의 일환으로 ‘공기와 물의 정화 실험’을 하게 되었는데 NASA의 과학자들이 관심을 두었던 것은 지구의 자정능력이었다고 그 해답은 살아있는 식물을 이용한다는 것이었다. 과학자들은 폐쇄공간에 생태학적 생명 유지 시스템을 만드는 가능성에 대해 연구하기 시작했다. 또한 우주선 내부 공기의 질이 가장 심각한 문제로 나타나, 기체 크로마토그래피(Gas Chromatography-MS)를 사용하여 측정해 본 결과 승무원이 있는 동안에 우주선 내부 공기에는 300가지가 넘는 휘발성 유기화합물이 존재하였다.

NASA의 존 C. 스테니스 우주센터에서는 밀폐된 실험실에서 식물이 폼알데하이드를 제거하는 효과가 있다는 연구결과를 발표했다(NASA, 1984). 이후, NASA에서는 ‘바이오 홈(Bio-home)’이라는 완전 밀폐된 작은 구조물을 개발했다. 바이오 홈은 열과 에너지를 최대한 차단할 수 있도록 설계되었고, 내부 인테리어는 휘발성 유기화합물이 배출되도록 플라스틱과 다른 합성물질을 사용하여 전형적인 건물병증후군 증상이 나타나도록 하였다. 바이오 홈에 실내식물과 활성탄을 넣은 플랜터(식물을 심

는 대형 용기)를 넣기 전과 후의 공기 표본을 각각 채집하여 측정한 결과, 휘발성 유기화합물이 저감되는 결과를 얻었다.

또한 Wolverton은 NASA와 공동으로 주로 실내에서 생육할 수 있는 식물들의 공기정화 효과들을 실험하였는데, 이 결과를 보면 트리클로로에틸렌, 벤젠, 포름알데히드와 같은 방향성 유기화합물을 실내생육식물이 하루에 잎 면적 100cm²당 350~1200 μg을 흡수, 정화시킨다고 밝히고 있어, 식물도 생물학적 오염제거의 가장 대표적인 방법이 될 수 있다는 것을 알 수 있다.

우리나라에서도 쾌적한 실내공기에 대한 관심이 높아지면서, 주거환경을 향상시키고자 하는 일반인들의 인식이 많이 달라졌다. 최근 공기정화식물의 실내공기 정화에 대한 효과가 알려지면서, 실내공간의 특성에 따라 공기정화식물을 배치하는 등 식물의 이용이 늘어나고 있다. 또한 건축, 조경 등의 여러 분야에서 연구가 활발히 이루어지고 있다. 우리나라에서도 각종 식물의 실내환경 조절효과에 대한 연구(이진희 외, 2004), 아파트 발코니에 실내정원을 설치했을 경우 거주자의 만족도(최윤정 외, 2005), 실내식물에 의한 습도조절기능에 관한 연구(손기철 외, 2004)등이 진행되고 있다. 또한 식물을 이용한 실내공기조절시 이산화탄소의 영향에 관한 연구(이규인 외, 2007)에서는 식물이 거실에 있는 경우에 이산화탄소의 농도가 낮아지는 것으로 나타났다. 이와 같이 식물에 의한 실내환경 개선의 효과는 각 분야의 폭넓은 연구를 통해 발전되고 있는 실정이다.

3. 식물을 이용한 시스템의 실내 공기 환경 개선효과

3.1 실험 개요

실내공기를 쾌적하게 하기 위하여 일반적으로는 환기장치를 이용하고 있다. 일반적인 환기시스템은 자연 환기와 기계 환기를 이용하여 강제적으로 실내공기를 환기시키는 방법을 사용하고 있다. 본 연

구에서는 기계 환기장치에 공기청정 효과를 더하기 위하여 식물과 토양을 설치한 후에 실험하였다. 또한 실험을 통하여 식물을 이용한 공기정화의 효과를 파악하고, 이를 환기시스템에 직접적으로 활용하여, 공동주택의 환기효율 향상 및 실내공기의 오염농도를 더욱 저감시킬 수 있는 시스템을 제안하고자 한다. 그림 1은 실험 장치의 구성을 나타낸 것으로 오염원 발생 챔버는 MDF 합판으로 제작하였으며, 900mm(가로)×600mm(세로)×300mm(높이)의 크기로 체적은 0.162m³이다.

본 실험에 사용된 필터 크기는 150mm(가로)×100mm(세로)×150mm(높이)의 크기로 조건에 따라 2개를 직렬 형태로 장착할 수 있다. 송풍기의 최대 풍량은 1200CMH이며, 송풍량을 조절할 수 있도록 슬라이더를 설치하였다. 덕트는 플렉시블 덕트와 PVC 재료의 원형덕트를 사용하였다.

오염원의 발생은 1-PASS 계통으로서 외기를 도입하고 오염물을 발생시킨 후 공기여과재 부분을 통과도록 구성되었다. 이 방식은 송풍기의 풍량을 조정하여 오염물을 일정 농도로 발생시키는 방법 중 가장 간단히 실시할 수 있는 방안으로 알려져 있다. 오염원의 발생농도는 송풍기의 풍량과 오염원이 들어있는 용기의 개구부를 이용하여 조정하였다.

그림 2에서 대상 식물인 파키라를 설치한 실험모습을 나타내고 있으며, 실험에 사용된 토양으로는 하이드로볼과 네오콜을 사용하였고, 식물은 공기정화식물로 알려진 아글라오네마와 파키라를 선정하였다.

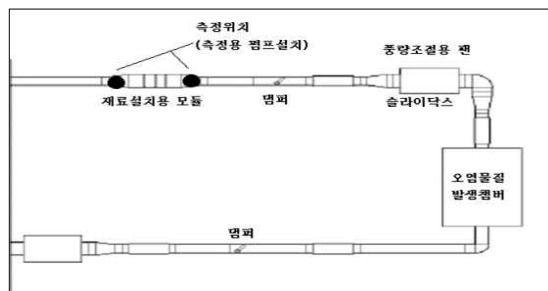


그림 1. 시스템 실험장치 구성



그림 2. 실험장면(파키라 설치)

3.2 식물을 이용한 시스템의 실험결과

3.2.1 식물적용 실험결과

환기시스템에 두 식물을 적용하여 VOCs 및 폼알데하이드의 농도저감 효과를 파악한 결과, 두 종류의 식물(아글라오네마, 파키라) 중에서는 아글라오네마의 VOCs 저감효과가 더 우수하였다. 아글라오네마를 설치했을 때, 폼알데하이드의 농도는 식물을 통과하기 전에 302.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 통과 후에 154.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 식물에 의한 저감량은 148.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 나타냈다. 파키라를 설치했을 경우에는 412.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 304.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 108.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 저감량을 나타냈다. 톨루엔은 아글라오네마를 통과하기 전에 1354.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 통과 후에 1054.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 식물

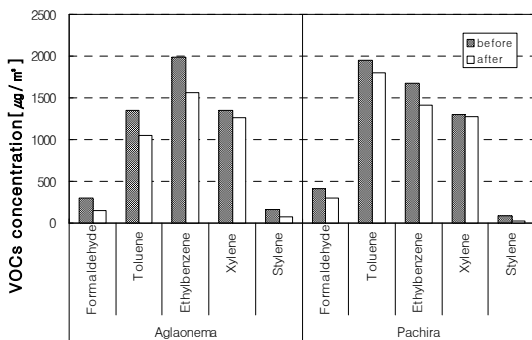


그림 3. 식물에 의한 VOCs 농도저감효과

에 의한 저감량은 300.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다. 에틸벤젠과 자일렌, 스티렌의 경우에도 아글라오네마를 설치한 경우가 파키라를 설치한 경우보다 농도저감량이 모두 크게 나타났다. 식물에 의한 VOCs 저감효과에서는 아글라오네마를 설치하는 경우에 효과가 더 우수하였다.

3.2.2 토양적용 실험결과

토양에 의한 효과에서는 하이드로볼과 네오콜에 의한 VOCs 저감효과를 비교하였으며, 추가로 차콜에 의한 효과도 실험하였다. 두 종류의 토양(하이드로볼, 네오콜)에 의한 폼알데하이드의 저감효과에서는 하이드로볼을 설치했을 경우에 199.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 저감량을 나타냈으며, 네오콜은 152.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이 저감되었다. 토양에 의한 VOCs 저감효과에서는 하이드로볼을 설치하는 경우에 효과가 더 우수하였다. 차콜에 의한 효과는 두 가지의 토양보다 VOCs 저감효과가 우수한 것으로 나타났으며, 이는 차콜의 뛰어난 흡착능력으로 VOCs의 저감효과가 더 증대된 것으로 생각된다.

4. 식물을 이용한 공기환경 개선 효과

4.1 실험 개요

본 연구에서는 식물의 실내 공기환경 개선효과

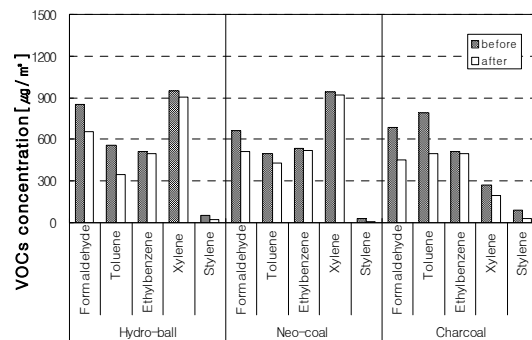


그림 4. 토양에 의한 VOCs 농도저감효과

를 파악하기 위한 실험을 실시하였으며, 이를 위하여 모델실험실을 제작하였다. 모델실험실은 가로 3.5m, 세로 3.5m, 높이 2.4m 규격으로, 실제 사용되는 7층 건물의 옥상에 정남향으로 위치하였다. 표5는 실험실의 구조 및 특성을 나타낸다. 실험실은 그림 5와 같이, 두개의 실험 공간과 각 실에 달린 베란다, 측정 및 작업공간으로 이루어져 있다. 실험실은 별도의 내부 건축자재마감은 없었으며, 휘발성 유기화합물을 인위적으로 발생시켜 그 저감 농도를 파악하였다. 실험 시, 측정인원은 출입문을 모두 밀폐한 후에 밖에 나간 후 측정을 시작하였다.

본 실험실은 두개의 실험공간에서 측정이 이루어졌으며, 1실에는 식물을 설치하고, 2실은 비교실험을 위하여 식물을 설치하지 않고 실험하였다. 실험실은 별도의 내부 건축자재마감은 없었으며, 휘발성유기화합물을 인위적으로 발생시켜 그 저감 농도를 파악하였다.

각 실험 공간(1실, 2실)에서 휘발성유기화합물(VOCs)의 개별물질 중 벤젠(Benzene), 톨루엔(Toluene), 에틸벤젠(Ethylbenzene), 자일렌(Xylene), 스티렌(Styrene)과 폼알데하이드(Formaldehyde)의 농도변화량을 측정하였으며, 실내에서 발생하는 VOCs는 식물이 설치된 후의 농도와 식물이 설치된 지 3일이 지난 후의 농도를 비교하여 저감량을 파악하였다. 식물이 설치된 실험실에서는 한 종류의

식물이 설치된 조건하에서, 3일간 연속적으로 측정되었다. 측정이 완료된 후, 실의 모든 개구부를 완전 개방하여 24시간 동안 환기를 실시하였다. 환기 후 다음 식물을 설치하고 3일 연속측정을 하였다. 각 식물 모두 동일한 방법으로 측정이 이루어졌으며, 미식재 실험실인 2실에서도 휘발성유기화합물의 농도변화 파악을 위하여 동일한 방법으로 측정이 진행되었다. 휘발성 유기화합물(VOCs)의 개별물질들은 Charcoal Tube를 사용하여 60분 동안 24 l의 실내공기를 포집하고 2ml의 CS₂(Carbon disulfide)용액으로 추출작업을 실시하였다. 추출된 용액은 GC-FID(Gas Chromatography-FID)로 분석을 실시하였다. 폼알데하이드는 DNPH-Cartridge를 사용하여 30분간 12 l의 공기를 포집하고, 아세토나이트릴(Acetonitrile)용액 5ml로 추출하였다. 추출작업 후에는 HPLC(High Performance Liquid Chromatography)로 분석하여 농도를 파악하였다.

본 실험은 크게 세 부분으로 나누어 실시되었으며, 식물의 종류에 따른 실내공기환경 개선효과, 식재량과 식재배치에 의한 효과, 생육조건에 따른 공기환경 개선효과와 조사로 이루어졌다.

(1) 식물 종류에 따른 효과에서는 외국식물 7종(벤자민고무나무, 웨프렐라, 칼란코에, 아글라오네마, 스킨답서스, 네이비, 산세베리아)과 자생식물 2종(팥손이, 산호수)을 대상으로 측정하였다. 실험에

표 3. 실험실의 구조 및 특성

구 분	Room 1	Room 2	베란다 1	베란다 2	측정 및 작업공간
용 도	식재공간	대조구	.	.	측정준비
구 조	완전 접합식 자립구조, 박공지붕				
정면방위	남향				
재료 특성	외피재	도장용융이연도금강판/프린트강판 : 0.45~0.5mm			
	내피재	도장용융이연도금강판 : 0.45~0.5mm			
크 기	바닥면적	3.5×3.5= 12.25 m ²	3.5×3.5= 12.25 m ²	3.5×1.5= 5.25 m ²	3.5×1.5= 5.25 m ²
	천장높이	2.45m			
열관류율 (kcal/mh °C)	벽판넬	0.266(kcal/m ² h °C)			
	지붕판넬	0.261(kcal/m ² h °C)			

표 4. 실험실 개요 및 측정기기

구 분	Room 1	Room 2
용 도	식재 공간	미식재 공간
크 기	3500(W)×3500(D)×2450(H)mm	
식물 종류	외국식물 7종: 벤자민고무나무, 웨프렐라, 칼란코에, 아글라오네마, 스킨답서스, 네이버, 산세베리아 자생식물 2종 : 팔손이, 산호수	
공 기 환 경	VOCs	GC-FID (Gas Chromatography-FID) Sampler: Charcoal tube Sampling method: Active sampling during 1 hours Desorption Method: Solvent desorption Carbon disulfide, 2ml
	Form aldehyde	HPLC (High Performance Liquid Chromatography) Sampler: DNPH cartridge Sampling method: Active sampling during 30minutes Desorption Method: Solvent desorption Acetonitrile, 5ml

사용된 식물마다 약간 크기의 차이는 있었으나, 대부분 삼목 번식한 2년생을 사용하였다.

(2) 식재량과 식재배치에 의한 효과에서는 식물의 종류에 따른 실험결과에서 효과가 우수한 식물 3종(아글라오네마, 파키라, 벤자민고무나무)을 선발하여 식재의 양과 배치위치를 변화시키면서 그 효과를 파악하였다. 식재의 양은 초기에는 실험실 공간의 10%, 5%, 3%로 배치하였으나, 실험결과 3%

의 경우 효과가 미미하여 제외하였다. 식재배치는 양지배치, 음지배치, 산재배치로 구분하여 배치였으며, 추후 음지배치의 경우는 제외하고, 양지배치와 분산하여 배치한 산재배치의 경우만 측정하였다.

(3) 식물의 생육조건에 따른 공기오염물질 저감 효과에서도 효과가 입증된 3종(아글라오네마, 파키라, 벤자민고무나무)을 대상으로 각 계절 변화에 따른 식물의 오염물질 저감효과를 파악하였다.

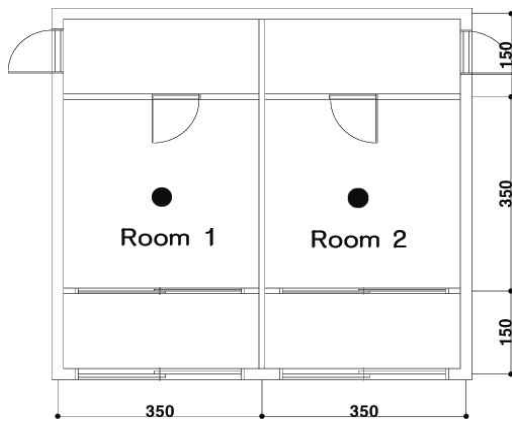


그림 5. 실험실 평면도

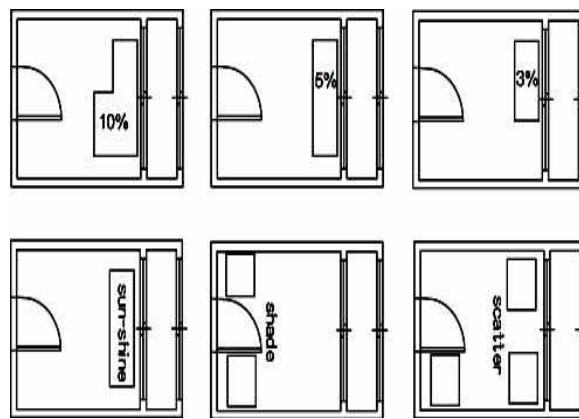


그림 6. 식재량과 식재배치변화

		
벤자민고무나무	쉐프렐라	칼란코에
		
아글라오네마	스킨답서스	네이버
		
산세베리아	팔손이	산호수

그림 6. 대상식물(외국식물 7종, 자생식물 2종)

4.2 식물에 의한 실내환경 개선효과

4.2.1 식물 종류에 의한 농도저감효과

외국식물 7종의 VOCs 및 폼알데하이드 저감효과를 실험한 결과, 톨루엔의 경우에는 벤자민고무나무의 효과가 가장 크게 나타났으며, 폼알데하이

드의 경우에는 벤자민고무나무나 아글라오네마의 효과가 크게 나타났다. 그 외의 VOCs 개별물질을 측정할 결과 톨루엔을 제외한 나머지 물질들의 농도저감 효과도 있었으나, 그 양은 미미한 것으로 나타났다.

자생식물 2종의 실험결과, 산호수를 식재한 경우

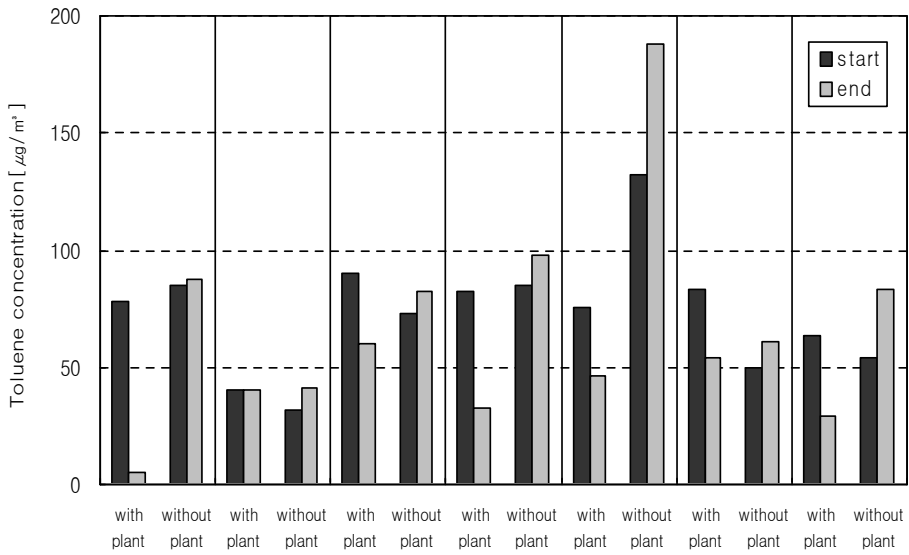


그림 8. 외국식물에 의한 톨루엔의 농도저감효과

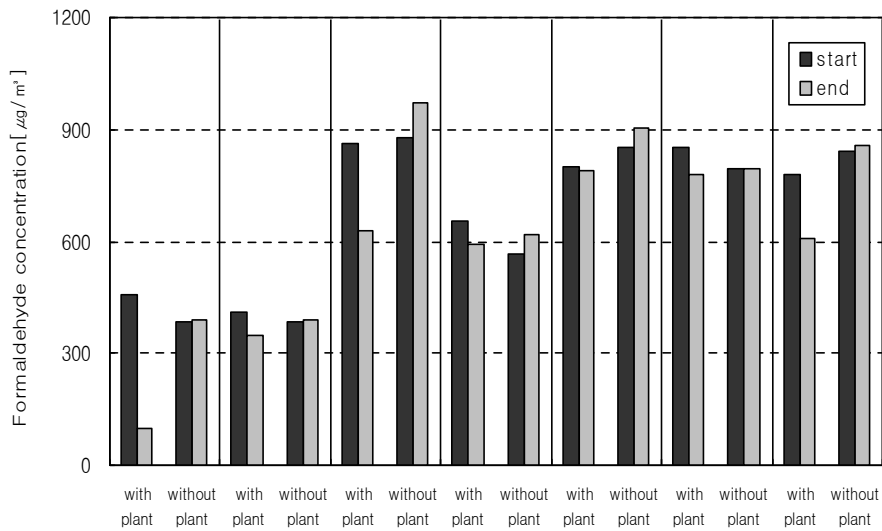


그림 9. 외국식물에 의한 폼알데하이드의 농도저감효과

에는 톨루엔의 저감효과가 우수하였으며, 팔손이를 식재한 경우에는 폼알데하이드의 저감효과가 우수하게 나타났다. 그 밖의 벤젠, 에틸벤젠, 자일렌, 스티렌의 경우에는 실내에서의 초기농도가 그다지

높지 않아, 자생식물에 의한 저감량이 다른 VOCs 개별물질보다 미미하게 나타났다.

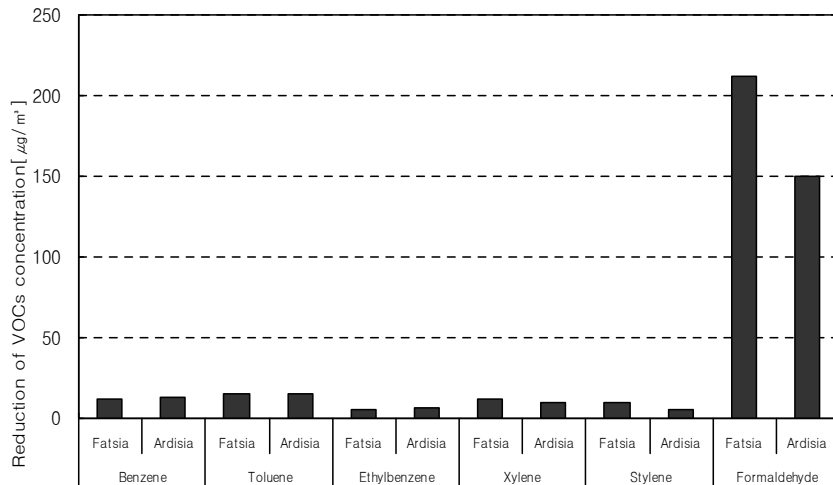


그림 10. 자생식물에 의한 VOCs 및 폼알데하이드의 농도저감량

4.2.2 식재량과 식재배치에 따른 실내환경 개선효과

본 연구는 공기정화식물의 3종인 벤자민고무나무, 아글라오네마, 파키라를 대상으로 식재량과 식재배치에 의한 폼알데하이드와 VOCs의 저감효과에 대하여 파악하였다.

그 결과, 식재량에 의한 실험결과에서는 식재량

이 실험실 공간의 10%로 배치한 경우에 각 VOCs 별로 저감효과가 더 크게 나타났다. 특히 폼알데하이드와 톨루엔의 농도저감량이 크게 나타났으며, 톨루엔의 경우에는 아글라오네마를 식재한 경우에 농도저감효과가 우수하였으며, 폼알데하이드의 경우에는 벤자민고무나무를 식재한 경우에 농도저감효과가 가장 우수한 것으로 나타났다. 공동주택에

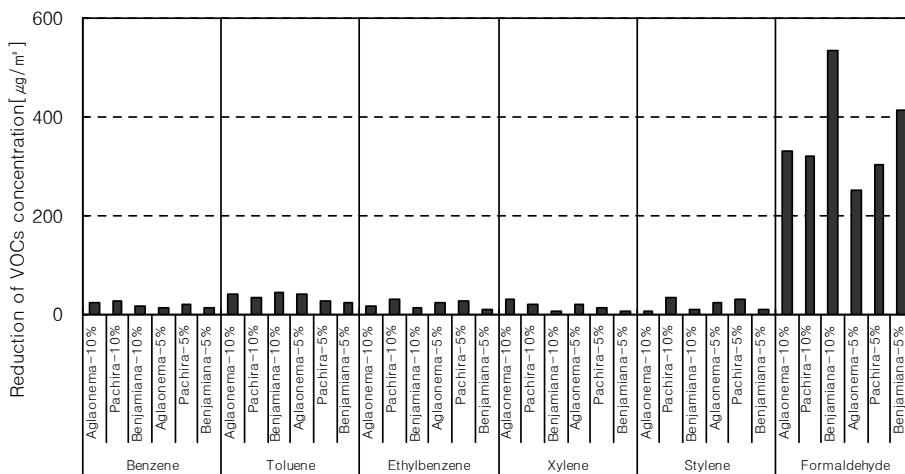


그림 11. 식재량에 의한 VOCs 및 폼알데하이드의 농도저감량

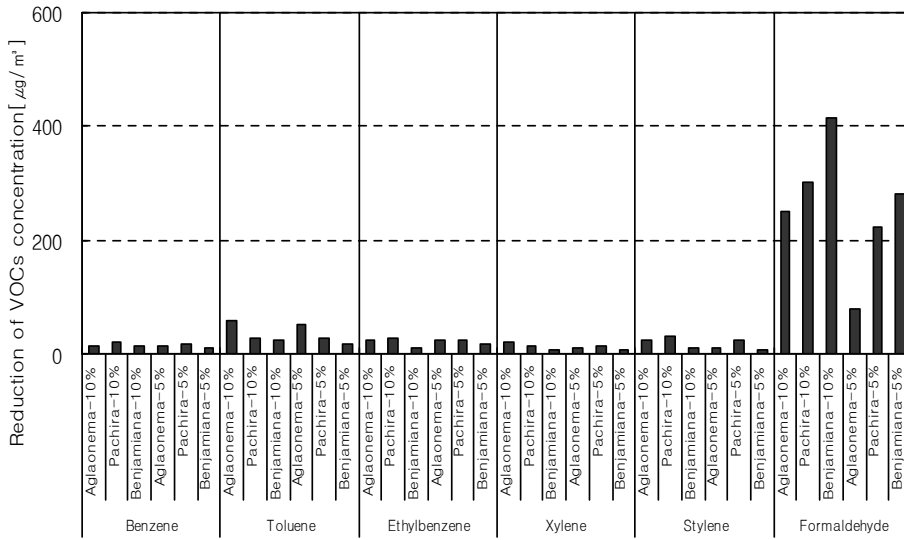


그림 12. 식재배치에 의한 VOCs 및 폼알데하이드의 농도저감량

서 각 VOCs 개별물질의 저감은 모두 중요하지만, 특히 톨루엔과 폼알데하이드의 위해성이 심각한 것을 고려할 때 실내공간에서 벤자민고무나무를 설치하는 것이 가장 효과적일 것으로 사료된다.

식재배치를 변화시켜 VOCs를 저감시키기 위한 실험에서는 일사를 많이 받을 수 있는 양지쪽에 배치하는 경우에 효과가 더 우수한 것으로 나타났다.

VOCs 개별물질 중에서는 톨루엔의 농도 저감효과가 가장 큰 효과를 나타냈으며, 폼알데하이드의 경우에도 농도저감효과가 우수하게 나타났다. 톨루엔을 저감시키기 위해서는 아글라오네마를 식재한 경우에 효과가 우수하였으며, 폼알데하이드는 벤자민고무나무의 효과가 가장 크게 나타났다.

4.2.3 식물의 계절별 VOCs 농도저감효과

각 계절별로 휘발성유기화합물(VOCs) 및 폼알데하이드의 농도를 저감시키기 위하여 공기정화식물을 이용하였다. 그 결과, 실험공간에 공기정화식물 3종을 각 계절별로 식재하여 실험한 결과, 대부분의 VOCs 개별물질에서 파키라나 벤자민고무나무를 여름에 식재한 경우에 가장 효과가 우수하였다.

톨루엔과 폼알데하이드의 농도저감량이 크게 나타났으며, 폼알데하이드의 경우에는 여름에 벤자민고무나무 식재시 534.5µg/m³의 저감량을 나타냈으며, 50% 이상이 저감된 것을 알 수 있었다. 톨루엔의 농도 저감효과에서는 벤자민고무나무를 여름에 식재했을 경우에 67.2%가 저감되어 가장 효과가 우수한 것으로 나타났다.

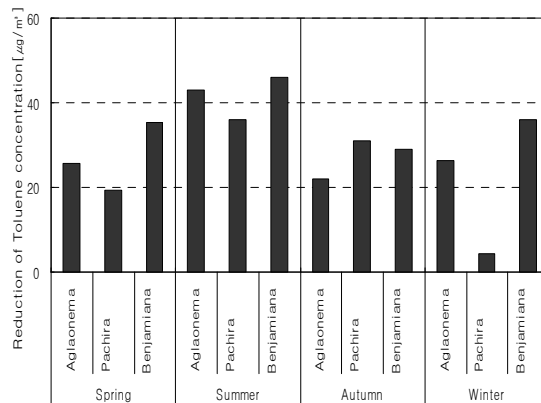


그림 13. 계절별 식재시 톨루엔의 농도저감량

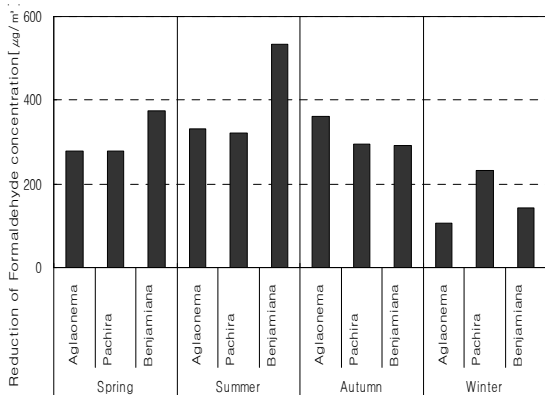


그림 14. 계절별 식재시 폼알데하이드의 농도저감량

5. 아파트 현장의 식물적용에 따른 실내 환경 개선효과

식물에 의한 실내공기오염물질 제거효과를 파악하기 위하여 신축아파트 현장에서 실험을 실시하였다. 측정대상 세대는 같은 구조의 2세대로, 비교를 위하여 한 세대는 식물을 설치하고, 다른 세대는 미설치한 후, 거실 중앙에서 측정을 실시하였다. 식

물에 의한 효과를 파악하기 위하여 벤젠, 톨루엔과 폼알데하이드의 농도를 측정하였다. 폼알데하이드의 경우 초기농도는 19.17~22.9µg/m³를 나타냈으며, 3일이 지난 후에 식재공간에서는 6.3µg/m³의 농도저감량을 나타냈다. 미식재 공간에서는 농도가 거의 유사한 값을 나타내었다. 측정당시의 실내의 온도는 6.3~8.0°C이었으며 농도저감효과가 실험실 실험의 경우보다 낮은 이유는 동계의 추운 날씨의 영향으로 사료된다. 벤젠의 경우 초기농도는 84.6~69.1µg/m³를 나타냈으며, 3일이 지난 후에 식재공간에서는 24.1µg/m³의 농도저감량을 나타냈다. 미식재 공간에서는 농도가 변화가 없거나 증가하는 값을 나타냈다. 톨루엔의 경우 측정 초기에는 148.7µg/m³를 나타냈으며, 3일이 지난 후에 식재공간에서는 54.3µg/m³의 농도저감량을 나타냈다. 미식재 공간에서는 농도변화가 거의없이 초기농도와 시간이 지난 후의 농도가 유사한 값을 나타냈다.

6. 결 론

실내공기환경 개선을 위한 각종 식물의 휘발성 유기화합물(VOCs)과 폼알데하이드 농도저감 효과에 관한 측정 및 분석을 실시한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

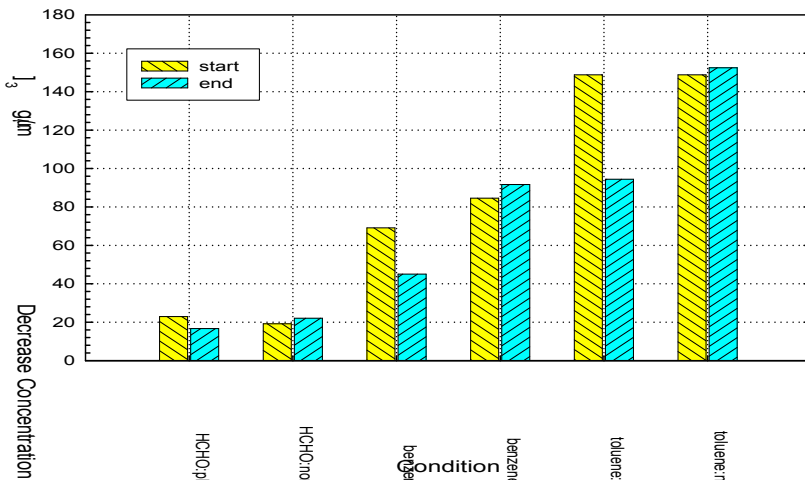


그림 15. 식물설치 유무에 따른 실내의 VOCs 및 폼알데하이드의 농도변화

(1) 식물과 토양을 환기시스템에 직접적으로 활용하여, 공동주택의 환기효율 향상 및 실내공기의 오염농도를 더욱 저감시킬 수 있는 시스템을 제작하였으며, 측정 및 분석을 실시하였다. 폼알데하이드의 경우, 하이드로볼에 의한 저감효과가 가장 우수했으며, 그 밖의 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 스티렌의 경우에는 모두 아글라오네마를 설치했을 때 저감효과가 가장 우수한 것으로 나타났다. 본 실험의 결과는 식물과 토양 모두 VOCs 의 저감효과가 있는 것으로 나타났으며, 특히 식물을 설치한 경우에 효과가 더 크게 나타났다.

(2) 공기정화식물 7종의 VOCs 및 폼알데하이드 저감효과를 실험한 결과, 톨루엔의 경우에는 벤자민고무나무의 효과가 가장 크게 나타났으며, 폼알데하이드의 경우에는 벤자민고무나무나 아글라오네마의 효과가 크게 나타났다. 그 외의 VOCs 개별 물질을 측정한 결과 톨루엔을 제외한 나머지 물질들의 농도저감 효과도 있었으나, 그 양은 미미한 것으로 나타났다.

(3) 자생식물 2종의 실험결과, 산호수를 식재한 경우에는 톨루엔의 저감효과가 우수하였으며, 팔손이를 식재한 경우에는 폼알데하이드의 저감효과가 우수하게 나타났다. 그 밖의 벤젠, 에틸벤젠, 자일렌, 스티렌의 경우에는 실내에서의 초기농도가 그다지 높지 않아, 자생식물에 의한 저감량이 다른 VOCs 개별물질보다는 미미하게 나타났다.

(4) 식재량에 의한 실험결과에서는 식재량이 실험실 공간의 10%로 배치한 경우에 각 VOCs 별로 저감효과가 더 크게 나타났다. 특히 폼알데하이드와 톨루엔의 농도저감량이 크게 나타났으며, 톨루엔의 경우에는 아글라오네마를 식재한 경우에 농도저감효과가 우수하였으며, 폼알데하이드의 경우에는 벤자민고무나무를 식재한 경우에 농도저감효과가 가장 우수한 것으로 나타났다. 공동주택에서 각 VOCs 개별물질의 저감은 모두 중요하지만, 특히 톨루엔과 폼알데하이드의 위해성이 심각한 것

을 고려할 때 실내공간에서 벤자민고무나무를 설치하는 것이 가장 효과적인 것으로 사료된다.

(5) 식재배치를 변화시켜 VOCs를 저감시키기 위한 실험에서는 일사를 많이 받을 수 있는 양지쪽에 배치하는 경우에 효과가 더 우수한 것으로 나타났다. VOCs 개별물질 중에서는 톨루엔의 농도 저감효과가 가장 큰 효과를 나타냈으며, 폼알데하이드의 경우에도 농도저감효과가 우수하게 나타났다. 톨루엔을 저감시키기 위해서는 아글라오네마를 식재한 경우에 효과가 우수하였으며, 폼알데하이드는 벤자민고무나무의 효과가 가장 크게 나타났다.

(6) 실험공간에 공기정화식물 3종을 계절별 생육 조건에 의해 식재하여 실험한 결과, 대부분의 VOCs 개별물질에서 파키라나 벤자민고무나무를 여름에 식재한 경우에 가장 효과가 우수하였다. 톨루엔과 폼알데하이드의 농도저감량이 크게 나타났으며, 폼알데하이드의 경우에는 여름에 벤자민고무나무 식재시 $534.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 저감량을 나타냈으며, 50% 이상이 저감된 것을 알 수 있었다. 톨루엔의 농도 저감효과는 벤자민고무나무를 여름에 식재했을 경우에 67.2%가 저감되어 가장 효과가 우수한 것으로 나타났다.

(7) 본 연구에서 다양한 실험조건에 의한 결과를 실증분석하기 위해, 실험결과 값의 차이를 알아보기 위한 T-test와 일원변량분석(One way Anova)를 실시하였다. 그 결과, 각 조건별로 모두 유의수준 $p < .05$ 에서 검증된 것을 알 수 있었다.

- 참고문헌 -

1. 송정은, 김용식, 손장열(2008), 식물에 의한 계절별 실내공기오염물질 저감효과에 관한 연구, 한국생태환경건축학회 논문집. 8(1).
2. 송정은, 방승기, 손장열, 김용식(2006), 식재량 및 식재 위치 변화에 따른 실내의 공기오염물질 저감효과, 한국생활환경학회지. 13(2).

3. 송정은, 방승기, 김용식, 손장열(2005), 식물을 이용한 실내공기환경 정화효과에 관한 연구, 한국생태환경건축학회 논문집, 5(4).
4. 최윤정, 김정민(2005), 아파트 실내정원의 겨울철 실내환경 조절효과, 대한건축학회 논문집(계획계).
5. 이진희(2004), 식물의 정화능력에 관한 연구, 한국 식물인간환경학회지.
6. 이진희(2004), 실내조경과 건강, 한국실내디자인학회 학술발표대회논문집, 6(6).
7. NASA(2004), The Importance of Plants in Space.
8. NASA(2004), NASA Research Enhances Benefits of Plant Experiment.
9. S.M.Owen, P.Harley, A.Guenther, C.N.Hewitt (2002), Light dependency of VOC emissions from selected Mediterranean plant species, ATMOSPHERIC ENVIRONMENT.
10. F.Haghighat, C.-S.Lee, W.S.Ghaly.(2002), Measurement of diffusion coefficients of VOCs for building materials : review and development of a calculation procedure, Indoor Air Vol.12, pp 81~91.
11. Owen, S.M., Boissard, C., Hewitt, C.N.(2001), Volatile organic compounds emitted from 40 Mediterranean plant species. Atmospheric Environment 35, 5393~5409.
12. X. Yang, Q. Chen, J. Zeng, J. S. Zhang, C. Y. Shaw. (2001), Effects of Environmental and Test Conditions on VOC Emissions from Wet Coating Materials, Indoor Air, Vol. 12, pp.270~278.
13. Paige Hunter, S.ted Oyama.(2000), Control of Volatile Organic Compound Emission, John Wiley & Sons Inc., Newyork.
14. J.J. Cornejo, F.G. Munoz, C.Y. Ma, A.J. Stewart (1999), Studies on the Decontamination of Air by Plants, Ecotoxicology.
15. Fall, R. 1999, Biogenic emissions of volatile organic compounds from higher plants, Reactive Hydrocarbons in the Atmosphere. Academic Press, NewYork.