

신축목조주택 내 마감자재에 따른 휘발성유기화합물(VOCs)의 방산특성*1

이 희 영*2 · 박 상 범*2 · 박 종 영*2 · 이 상 민*2†

Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds by Finishing Materials in a Newly Constructed Wooden House*1

Hee-Young Lee*2 · Sang-Bum Park*2 · Jong-Young Park*2 · Sang-Min Lee*2†

요 약

본 연구는 목재를 이용하여 축조한 주택에 친환경마감자재를 달리하여 조성한 후 시험실의 실내오염물질 방산 저감에 미치는 영향에 대해 검토하고자 하였다. 측정 결과 모든 시험실에서 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠 및 스티렌의 함량이 신축 공동주택의 실내공기질 권고기준치 이하로 나타났다. 시험실 R1-1과 R2-1에서 다른 종류의 벽지를 사용함에 따른 차이를 본 결과, 황토 벽지를 사용한 R1-1에서 상대적으로 높은 자연적인 VOCs (Natural VOCs) 값을 얻었으며, 인위적인 VOCs (Anthropogenic VOC) 및 총VOCs (Total VOCs)의 함량도 높게 나타났다. 시험실 R1-2와 R2-2에서 대나무숯 패널의 유무에 따른 방산특성을 비교한 결과 대나무숯 패널을 설치한 시험실에서 AVOC 함량이 높게 나타났는데 이것은 패널부착 시 사용된 접착제에 일부 영향을 받은 것으로 판단된다. 시험실 R1-3 (거실)은 나머지 4곳의 시험실(침실)에 비해 낮은 TVOC 함량을 나타내었고, 다른 시험실과 비교하였을 때 TVOC에 대한 NVOC의 구성비율이 높은 것으로 보아 마감자재로 사용한 편백의 영향을 받은 것으로 판단된다.

ABSTRACT

This study aimed at examining the effect of rooms decorated by eco-friendly finishing materials in a newly built wooden house on the emission of indoor air pollutions. According to the results

* 1 접수 2007년 9월 13일, 채택 2007년 10월 22일

* 2 국립산림과학원 임산공학부, Department of Forest products, Korea Forest Research Institute, Seoul, Korea

† 주저자(corresponding author) : 이상민(e-mail: sml5@foa.go.kr)

of examination, the levels of benzene, toluene, ethyl benzene and styrene in all the rooms were below criteria of indoor air quality of newly-constructed houses. The levels of natural volatile organic compounds (NVOC), anthropogenic volatile organic compounds (AVOC) and total volatile organic compounds (TVOC) in room R1-1 which had Hwangto wall covering on it, were relatively higher than in room phytoncide wallpaper covered R2-1. The room R2-2 where bamboo charcoal panel used for wall covering showed higher level of AVOC compared to the room R1-2. Living room R1-3 was found to contain less TVOC, compared to the other four rooms. In addition, the ratio of NVOC to TVOC in the living room was higher than in the other rooms. This seemed to be attributed to *Cryptomeria Japonica*, the living room finished material.

Keywords: indoor air quality, finishing material, volatile organic compounds

1. 서 론

최근 삶의 질의 향상과 더불어 건강에 직접적인 영향을 미치는 실내환경에 대한 관심이 증대되고 있다. 하루의 80~90% 이상을 실내에서 생활하는 현대인들은 실내오염물질에 항상 노출되어 있으며 새집증후군(Sick house syndrome, SHS) 및 빌딩증후군(Sick building syndrome, SBS) 등의 문제로 건강을 위협당하고 있다(Ingrosso, 2002). 실내오염물질에 반복적으로 노출되면 눈·코·목 점막자극, 현기증, 두통, 피로 등을 일으키며 과민성 폐렴이나 천식과 같은 질병의 원인으로 작용할 수도 있다. 이에 환경부는 「다중이용시설 등의 실내공기질 관리법」을 시행하고, 실내오염원의 원인이 될 수 있는 실내사용 건축자재에 대한 규제를 실시하고 있다.

실내공기오염에 의한 새집증후군은 주택 신축 시에 사용되는 건축자재, 가구 등에서 방산되는 포름알데히드 및 휘발성유기화합물(VOCs, Volatile Organic Compounds) 등에 의해 야기되며, 건물의 고기밀화에 따른 환기량 감소 등에 의해 더욱 악화될 수 있다(Guo *et al.*, 2003; WHO, 1984).

실내공기오염원을 제어하는 방법으로는 희석제어(Dilution control), 제거제어(Removal Control) 및 발생제어(Source Control)등 세 가지로 나눌 수 있으며, 희석제어는 적절한 환기를 통해 실외 청정공기를 실내로 유입시켜 실내 오염공기를 치환하거나 희석하여 오염물질의 농도를 낮추는 방법이고, 제거

제어는 필터나 공기집진기로 공기 중에 포함되어 있는 먼지를 여과한다거나 공기청정기 등 별도의 기계장치나 광촉매기술 등의 화학반응을 이용하여 이미 방산된 오염물질을 제거하는 방법이다. 마지막으로 발생제어는 처음부터 오염물질의 방산이 적은 건축자재를 이용하는 방법이다. 이러한 방법들 중 저방산 자재의 사용이 비용이나 효과 면에서 환경에 대한 영향을 최소화할 수 있는 가장 효과적인 방법이다. 희석제어와 제거제어법은 환기설비나 공기청정기 등의 설치가 필요하여 에너지 절약차원에서 적합하지 않으며 경제적으로도 추가비용이 발생하며, 나아가 외기환경에 나쁜 영향을 미칠 수 있으므로 효과적인 방법이 아니다(김 등, 2006).

다시 말해 실내공기질(IAQ: Indoor Air Quality) 개선을 위해서는 건축자재의 유해물질 방산량을 줄이는 것이 가장 직접적이고 효과적인 방법이라 할 수 있다. 한편 건축자재로서의 목재는 천연 VOCs를 방산함으로써 신진대사 촉진 및 숙면을 유도하는 등 건강상 유익함이 입증된 바 있으며(강 등, 2004), 일반주택보다 목조주택에서 실내오염물질의 방산량이 상대적으로 낮은 것으로 보고되고 있다(樋田淳平, 2007). 본 연구에서는 최근 신축된 목조주택에서 여러 가지 친환경 마감자재로 시공한 시험실 내의 휘발성 유기화합물(VOCs)을 측정하여 마감자재에 따른 실내오염물질 방산특성을 살펴보았다.

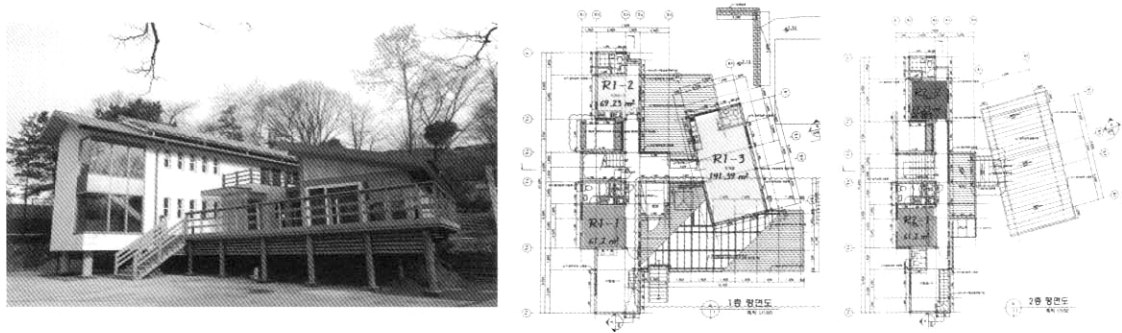


Fig. 1. Places for measuring indoor air pollutions in a newly constructed wooden house.

Table 1. List of main finishing materials used in measured rooms

	Bed room (R1-1)	Bed room (R1-2)	Living room (R1-3)	Bed room (R2-1)	Bed room (R2-2)
Under wall & under ceiling	Gypsum board	Gypsum board	Gypsum board	Gypsum board	Gypsum board
Wall & ceiling	Hwangto mortar Hwangto wall covering	Charcoal mortar Korean paper	<i>Cryptomeria Japonica</i> Stain	Hwangto mortar Phytoncide wall covering	Charcoal mortar Korean paper Bamboo charcoal panel

2. 재료 및 방법

2.1. 시료채취

본 연구에서는 마감자재에 따른 휘발성 유기화합물의 방산특성을 살펴보고자, Fig. 1과 같이 목조주택을 축조하여 마감자재를 각각 다르게 시공한 5개의 시험실에 대하여 방산거동을 조사하였다. 사용된 마감자재의 종류는 Table 1에 제시하였으며, 측정된 시험실의 면적은 R1-1과 R2-1은 61.2 m², R1-2와 R2-2는 69.23 m² 및 R1-3은 141.39 m²이었다. 마감재 처리를 위해 사용된 접착제(풀)는 친환경 제품을 사용하여 접착제에 대한 영향을 최소화하였으며, 시험실 R2-2의 대나무숯 패널은 0.35 × 0.35 m로 15매 부착하였다.

목조주택 완공(2006년 12월 29일) 한 달 후 2007년 2월 1일로부터 일주일 내에 측정이 이루어졌으며, 시료채취는 신축공동주택의 실내공기질 측정방

법에 준하여 실시하였다. 시료채취장치는 벽으로부터 1 m 이상 떨어진 위치에서 바닥 면으로부터 1.2 ~ 1.5 m 정도 높이의 시험실 중앙에 설치하였다. 창문과 문을 모두 개방한 상태에서 30분간 환기시킨 후, 외부공기가 유입될 수 있는 모든 창문과 문을 닫은 후 5시간 밀폐상태를 유지한 다음, 30분간 시료를 채취하였다. 휘발성유기화합물(VOCs)은 고체 흡착관(Tenax TA, Supelco, USA)에 펌프(MP-Σ 30H, Sibata, Japan)를 연결하여 0.1 l/min의 유량으로 30분간 2회 채취하였다. 한편, 시료는 채취 후 1주일 이내에 분석하였으며, 채취한 시료는 밀봉한 상태에서 분석 전까지 4°C에서 냉장보관하였다.

2.2. 시료분석

고체 흡착관에 흡착된 휘발성유기화합물은 열탈착 장치(STD 1000, DANI, Italy)에서 1차적으로 280°C에서 15분간 열탈착 후 -10°C로 유지된 저온 농축관(cold trap)에 농축한 후 300°C에서 15분간

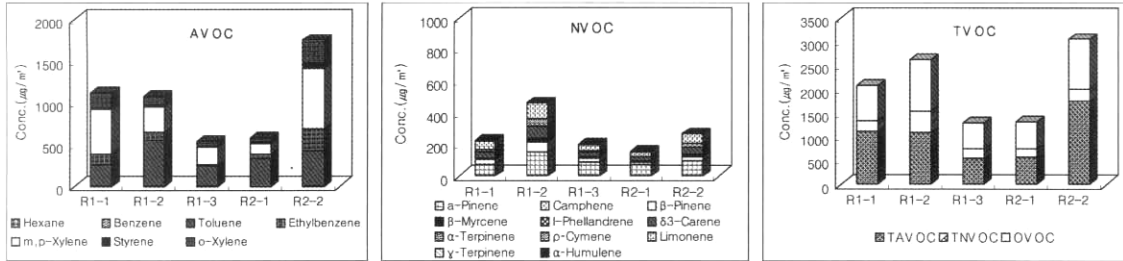


Fig. 2. Emission characteristics of volatile organic compounds and carbonyl compound in each room.

열탈착하여 GC/MSD로 주입하였다. 휘발성 유기화합물 분석에는 GCMS-QP2010 (Shimadzu, Japan)을 이용하였으며, VB-1 capillary column (60 mm length × 0.32 mm i.d. × 1.00 µm film thickness, Valco instruments, Co., USA)을 사용하였다. Split ratio는 30으로 하였고, 운반기체인 He의 선상속도는 1.0 ml/min로 조정하였다. 오븐온도는 40°C에서 5분간 머문 후 220°C까지 4°C/min 속도로 승온한 다음 10분간 머물도록 조정하여 총 분석시간이 60분이 되도록 설정하였다. MSD 분석 조건은 capillary direct interface 온도, 250°C; ion source 온도, 200°C; ionization energy, 70 eV; mass range, 35~350 amu로 설정하였다.

크로마토그램 상에서 검출되는 동정 가능한 천연 식물성분 유래의 천연 VOC (NVOC) 및 인공 화학물질 유래의 인공 VOC (AVOC)는 각각의 표준물질을 단계적으로 희석하여 검량선을 작성하였으며, retention time 및 Wiley library database를 이용한 mass spectrum과 비교하여 동정 및 정량하였다. 또한 n-Hexane에서 n-Hexadecane까지의 범위에서 동정 불가능한 기타 화합물(OVOC)은 톨루엔으로 환산하여 함량을 구하였다. 또한, 간이측정 장치인 Portable VOC monitor (JHV-1000, JMS, Japan)를 이용하여 시험실이 환기, 밀폐 및 측정되는 동안 실내오염물질의 변화 추이를 동시에 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 신축목조주택의 휘발성유기화합물 방산특성

신축목조주택의 휘발성유기화합물(VOCs) 분석 결과는 Fig. 2에 제시하였다. 모든 시험실에서 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠 및 스티렌의 함량이 신축 공동주택의 실내공기질 권고기준치 이하로 나타났으며, 전반적으로 시험실 R2-2에서 가장 높은 함량을 나타내었다. 동정된 휘발성유기화합물 중에서는 톨루엔 및 *m,p*-자일렌이 높은 비중을 차지하여 기존의 보고와 일치하는 결과를 나타내었고(장 등, 2007), 천연 휘발성유기화합물(NVOC) 중에서는 모노 테르펜류인 α -피넨, β -피넨 및 리모넨 등이 전체 NVOC의 66~78% 정도의 높은 비중을 차지하였다. 이러한 테르펜류(NVOC)는 일반주택의 3~10배 정도의 함량을 나타내며, TVOC 함량을 증가시키는 한 원인이라 알려져 있다(樋田淳平, 2007). 또한 모노 테르펜류는 대기오염물질 중 오존 등과 광화학 반응이 빠르게 일어나며, 이 중 α -피넨, β -피넨 및 리모넨은 chemical lifetime이 다른 모노테르펜류보다 상대적으로 긴 것으로 보고되고 있다(Kesselmeier *et al.*, 1990).

준공 1년 미만의 신축공동주택의 거실을 대상으로 한 보고에서 벤젠 12.56 µg/m³, 톨루엔 168.23 µg/m³, 에틸벤젠 30.65 µg/m³, 자일렌 34.90 µg/m³ 및 스티렌이 499.38 µg/m³로 본 연구와 비교하여 볼 때 벤젠과 스티렌을 제외하고는 다소 높게 측정되었

다(박 등, 2007). 이러한 차이는 본 연구에서 측정된 목조주택이 축조된 지 1개월 정도 경과되었으며 시험실 4곳이 건축면적 좁은 침실을 대상으로 하였기 때문에 농도차이가 있었던 것으로 사료되며 면적이 넓은 거실의 경우 유사한 범위를 나타내는 것을 알 수 있었다.

3.2. 벽지사용에 따른 휘발성유기화합물의 방산특성

실내오염물질 저감화의 한 방법으로 실내에 친환 경건축자재를 사용하여 측정된 연구에서 오염물질의 방산특성이 일반건축자재를 사용한 경우와는 달리 벽지, 주방가구, 일반가구 순으로 벽지가 가장 큰 영향을 미치는 것으로 보고되었다(홍 등, 2004). 다른 벽지를 사용한 시험실 R1-1 (24.7°C, 31.2% RH)과 R2-1 (23.9°C, 23.2% RH)에서 차이를 본 결과 황토 벽지를 사용한 R1-1에서 상대적으로 높은 NVOC 값을 얻었으며, AVOC 및 TVOC의 함량도 높게 나타났다. 측정 중 R1-1의 실내온도가 상대적으로 0.8°C 정도 높았던 것으로 보아 일부 온도에 영향을 받았을 것으로 보인다. 이러한 온도에 의해 방산량은 영향을 받으나 유의적인 상관관계가 나타나지 않는 것으로 보고되었다(Haghighat *et al.*, 1998). AVOC 저감효과가 있는 것으로 알려진 피톤치드 벽지를 사용한 시험실 R2-1은 다른 시험실에 비해 AVOC 함량이 현저히 낮게 나타나는 것을 알 수 있었다.

3.3. 대나무숯 패널사용에 따른 휘발성유기화합물의 방산특성

시험실 R1-2 (27.8°C, 28.5% RH)와 R2-2 (27.8°C, 21.2% RH)는 5가지 개별 VOC에 대해 실내공기 질 권고기준치 이하를 나타내었다. 대나무숯 패널의 유무에 따른 방산특성을 본 결과, R2-2에서 높은 AVOC 함량을 나타내었으며, 이는 대나무숯 패널 부착 시 사용한 접착제에 일부 영향을 받았을 것으로 보였다. 시험실 R2-2에서 R1-2에 비해 AVOC 중 유일하게 톨루엔 함량만 감소된 것으로 보아 숯에

영향을 받은 것으로 추정되며, 특히 숯 내부의 1 nm 이하의 마이크로포아(Micro pore)에 물리적 흡착이 이루어졌을 것으로 보인다(木質複合材料技術研究組合編, 1998). 물리적인 흡착의 경우 반데르발스 힘으로 일컬어지는 전자의 일시적인 치우침에 의해 분자간의 응집력이 형성되며, 분자량이 큰 화합물일 수록 전자수를 많이 내포하고 있기 때문에 물리적 흡착이 유리하다고 하였다(박 등, 2003). 대나무숯 패널의 탈취성능 평가(자료 제시하지 않음) 시 분자량이 큰 벤젠, 톨루엔, 자일렌 순으로 탈취능이 높게 나타났으나, 실제 시험실에 대나무 숯 패널 설치하였을 때 일치하는 결과가 나오지 않았다. 따라서 톨루엔 이외의 나머지 AVOC들의 흡착을 간접하는 요인 여부에 대한 추가적인 실험이 이루어져야 할 것으로 보인다. 또한 R1-2에서 R2-2보다 높은 NVOC의 함량을 나타내었는데, 측정 중 습도차이에 의한 것으로 추정되며, Clausen 등의 연구에서 수증기는 극성을 띤 물질의 방산을 돕는다는 보고에 의해 습도가 높았던 R1-2에서 AVOC에 비해 극성 정도가 큰 NVOC의 방산을 촉진시켰을 것으로 사료된다(Clausen *et al.*, 1991). 또한 다른 보고에서는 벤젠, 에틸벤젠, 스티렌, 자일렌, 포름알데히드는 상대습도 20~60% 범위 내에서는 유사한 방산특성을 나타내다가 상대습도 60~70% 부근에서 급격히 증가하는 경향을 나타내었고, 톨루엔은 습도의 변화에 따른 큰 농도 변화 없었던 것으로 나타났다. 또한 측정 중 실내온도에서는 차이를 보이지 않아 온도에 의한 영향은 배제할 수 있을 것으로 사료된다.

3.4. 침실 및 거실의 휘발성유기화합물의 방산특성

국내산 목재를 내장재로 사용한 거실 R1-3 (27.1°C, 22.0% RH)은 침실인 나머지 4곳의 시험실에 비해 낮은 TVOC 함량을 나타내었다. 축조 후 내부시공이 이루어지는 동안 출입으로 인한 외부공기에 대한 노출이 가장 많았을 것이며, 이러한 거실의 특성 상 잦은 출입으로 인한 인위적인 통풍이 이루어졌을 것으로 보였다. 김 등(2005)의 연구에서 환기 시 밀

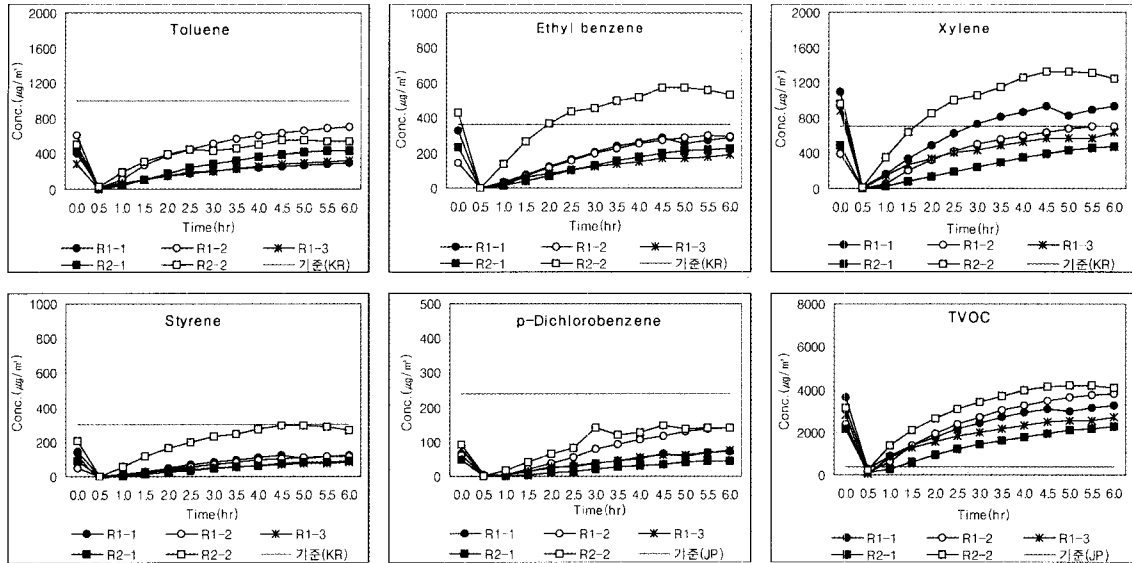


Fig. 3. The changes of VOCs during measurements.

폐시켰을 때보다 현저히 감소됨을 알 수 있듯이, 환기를 통한 실내오염물질 저감을 간접적으로 알 수 있었다. 또한 편백의 다른 수종에 비해 현저히 낮은 NVOC 방산량을 보이는 것으로 보고되고 있다(박 등, 2006).

다른 시험실과 비교하였을 때 TVOC에 대한 NVOC의 구성비율이 높은 것으로 보아 실내 사용목재인 편백으로부터 방산된 NVOC의 영향을 받았을 것으로 보이며, 목재의 NVOC의 방산특성에 대한 연구에서 편백의 주요 구성성분이 α -피넨 및 β -리모넨이라는 보고와 일치하는 결과를 나타내었다(박 등, 2006).

3.5. 간이측정 장치를 이용한 휘발성 유기화합물 측정

신축 목조주택의 실내공기질 측정방법에 따른 환기, 밀폐 및 시료채취를 실시하는 과정에서 간이측정 장치를 이용하여 휘발성유기화합물의 변화 양상을 함께 관찰하였다. Fig. 3에서와 같이, 30분간 충분히 환기가 이루어진 것으로 보이며, 측정시점에 이르기까지 시험실 내에 실내오염물질농도가 포화

상태에 도달한 것을 알 수 있었으며, 모든 시험실에서 실내공기질 공정시험방법상의 30분 환기 후 5시간 밀폐한 다음 시료채취가 적절함을 확인할 수 있었다(장 등, 2006). 또한 측정결과 모든 시험실에서 톨루엔, 스티렌 및 파라디클로로벤젠이 기준치 이하를 나타냈고, TVOC는 모든 방에서 기준치 이상을 나타내었다. Fig. 4에서 시료채취되는 동안 측정된 간이측정 장치의 데이터와 GC/MSD 분석결과를 비교해 본 결과 함량 면에서는 간이측정 장치로 분석한 값이 1.2~11.4배 정도 높게 측정되었고, 측정값이 다소 차이를 보였지만 전반적으로 유사한 경향을 나타내었다.

4. 결 론

본 연구는 주택 실내의 공기질 측정을 위한 실험 실험으로서 신축한 목조주택의 실내 마감자재를 달리하여 시공한 시험실의 휘발성유기화합물 방산특성을 비교검토하였다.

1) 신축목조주택의 휘발성유기화합물(VOCs) 분석결과 모든 시험실에서 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠 및 스티렌의 함량이 신축 공동주택의 실내공기질 권고

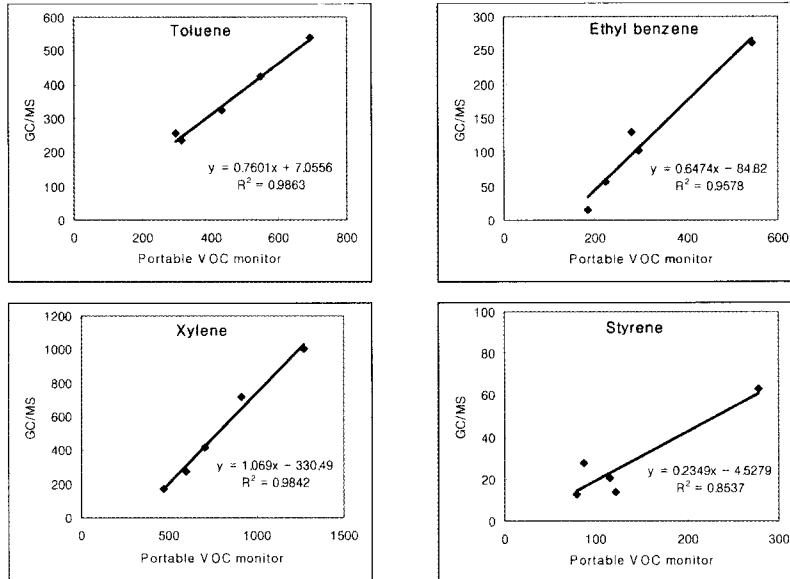


Fig. 4. The analysis of correlation between VOC measurement methods.

기준치 이하로 나타났다.

2) 황토 벽지를 사용한 R1-1에서 피톤치드 벽지를 사용한 R2-1에 비해 상대적으로 높은 NVOC 값을 얻었으며, AVOC 및 TVOC의 함량도 높게 나타났다. AVOC 저감효과가 있는 것으로 알려진 피톤치드 벽지를 사용한 시험실 R2-1은 다른 시험실에 비해 AVOC 함량이 현저히 낮게 나타나는 것을 알 수 있었다.

3) 시험실 R1-3 (거실)은 나머지 4곳의 시험실(침실)에 비해 낮은 TVOC 함량을 나타내었으며, 다른 시험실과 비교 시 TVOC에 대한 NVOC의 구성비율이 높았고, *a*-피넨 및 *d*-리모넨 함량이 높게 나타나 마감자재로 사용한 편백의 영향으로 판단된다.

4) 본 연구에서 측정된 실내공기질은 마감자재의 차이뿐 아니라 시험실의 위치에 따른 채광량의 차이로 인한 실내온도 및 습도 등 환경적인 요인도 작용하였던 것으로 보여진다. 각 마감자재의 VOCs 방산특성에 대한 연구가 추가적으로 요구되며, 본 연구 결과와의 상관성에 대한 조사가 필요하다고 생각된다.

참고 문헌

- 강하영. 2004. 피톤치드의 생리활성기능 1. 산림. 11: 54~56.
- 김선숙, 최동희, 박영석, 이규동, 여명석, 김광우. 2005. 신축공동주택의 입주 전 실내 공기질 개선방안별 특성. 한국생활환경학회지. 12(2): 106~111.
- 김진아, 김수민, 김현중. 2006. FLEC (Field and Laboratory Emission Cell)법의 소개 및 적용사례. 한국 실내환경학회지. 3(2): 79~96.
- 박상범. 2003. 악취의 특성과 숲의 흡착기능. 한국 숲 연구회; 숲과 목초액. 11: 19~31.
- 박상은, 김현욱, 심상효, 이세훈, 구정완. 2007. 신축공동주택의 입주 전후 VOCs 및 HCHO 농도. 한국환경보건학회지. 33(2): 98~103.
- 박현주. 2006. 실내 공기질 향상을 위한 목질제품의 휘발성유기화합물 및 포름알데하이드의 방출량 비교연구. 석사학위논문. 건국대학교. 45~54.
- 조현, 최종문, 김우재. 2006. 신축공동주택의 실내 휘발성유기화합물(VOCs) 실태조사 및 습도변화에 따른 발생 특성 평가. 한국생활환경학회지. 13(4): 283~289.
- 장성기, 임수진, 이태형, 천제영, 류정민, 서수연. 2006. 신축 공동주택에서 밀폐시간 증가에 따른 실내공기 오염물질의 농도변화. 한국실내환경학회지. 3(4): 387~398.

9. 장성기, 천재영, 이태형, 임수길, 류정민, 서수연, 임정연. 2007. 신축 공동주택에서 실내공기오염물질(휘발성유기화합물 및 카르보닐화합물) 농도분포 특성. 한국분석과학회지. 20(1): 17~24.
10. 홍천화, 유복희, 박용승, 조현. 2004. 신축공동주택의 실내농도에 영향을 미치는 건축자재의 VOCs와 포름알데히드의 방출 특성. 제19회 에너지절약기술 Workshop. 221~230.
11. Clausen, P. A., P. Wolk, E. Holst, P. A. Nielsen. 1991. Long term emission of volatile organic compounds from waterborne paints. *Methods of comparison. Indoor Air*. 1: 562~576.
12. Guo, H., F. Murray, and S. C. Lee. 2003. The development of low volatile organic compound emission house-a case study. *Building and Environment*. 38: 1413~1422.
13. Haghghat, F., L. De Bellis. 1998. Material emission rates: Literature Review, and the Impact of Indoor air temperature and relative humidity. *Building and Environment*. 33(5): 261~277.
14. Ingrosso, G. 2002. Free radical chemistry and its concern with indoor air quality: an open problem. *Microchemical Journal*. 73: 221~236.
15. J. Kesselmeier, M. Staudt. 1999. Biogenic volatile organic compounds (VOC) an overview on emission, physiology and ecology. *Journal of Atmospheric Chemistry*. 33: 23~88.
16. WHO's regional office for Europe reports. 1984. Working Group on Indoor air Research. 264~268.
17. 樋田淳平, 高塚早紀, 山田雅章, 瀧欽二, 吉田弥明, 山田誠. 2007. 改正建築基準法に対応した新築住宅における室内空気質の實態調査(第2報): VOC氣中濃度の實態. *木材學會誌*. 53(1): 40~45.
18. 木質複合材料技術研究組合編. 1998. 木質複合材料研究成果報告書. 2章. 炭素材料による機能性木質材料の開発. 209~374.