건축용 바닥재로부터의 휘발성유기화합물 방출특성

Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Building Flooring Materials

윤중섭*,****・이명화**・엄석원*・김민영*・김종호***・김신도****,†
Joong-Seop Yun*,****・Myong-Hwa Lee**・Seok Won Eom*
Min Young Kim*・Jong-Ho Kim***・Shin Do Kim****,†

*서울특별시 보건환경연구원・**한국생산기술연구원 청정생산시스템연구본부
한서대학교 환경공학과・*서울시립대학교 환경공학부
*Seoul Metropolitan Government Research Institute of Public Health and Environment
**Green Chemistry and Manufacturing System Division, Korea Institute of Industrial Technology
***Department of Environmental Engineering, Hanseo University
****Department of Environmental Engineering, University of Seoul

(2010년 5월 18일 접수, 2010년 10월 29일 채택)

Abstract : The emission of volatile organic compounds (VOCs) from building materials is one of great concerns due to maintain airtight condition of a building to reduce energy consumption, and it causes the deterioration of indoor air quality. Therefore, the emission characterization of VOCs from building materials is necessary to improve indoor air quality. Emission characteristics of VOCs from a plywood flooring that is one of the most commonly used materials in an under-heating system, and from an adhesive that is generally used to stick a plywood flooring to a concrete floor were investigated using an emission chamber test in this study. It was found that the VOCs emission factor was dependent upon and proportional to indoor temperature, and the emission characteristics were closely related to the existing places and conditions of VOCs sources inside the building materials. Maximum emission factors of hexane and toluene from building materials were generally observed at the beginning, however, only that of toluene from a plywood flooring was shown after 6 hours from the beginning. It could be considered that the existing place and condition of toluene source inside a plywood flooring could influence on the VOCs emission. From this study, bake-out time more than 72 hours could be recommended before moving in to avoid the exposure to high concentration of VOCs emitted from an under-heating system.
Key Words : *Flooring, Plywood, Adhesive, VOCs, Emission Test*

요약 : 에너지절감에 대한 인식이 높아짐에 따라 점차 건물이 밀폐화되고 있으며, 이로 인하여 실내공기질에 영향을 미치는 건축자재로부터의 휘발성유기화합물 방출에 대한 관심이 높아지고 있다. 그러므로 실내공기질을 개선하는데 있어 건축자재로부터의 VOCs 방출특성을 파악하는 것이 무엇보다 중요하다. 본 연구에서는 우리나라가 온돌문화인 점을 고려하여 대표적인 건축자재인 온돌마루와 접착제를 대상으로, 방출챔버시험을 통하여 온도 및 시간경과에 따른 헥산, 톨루엔 및 TVOCs 방출특성을 살펴보았다. VOCs의 방출속도는 온도와 비례관계를 나타내었으며, 바닥재에 존재하는 VOCs 발생원이 어느 위치에, 어떠한 형태로 존재하느냐가 시간의 경과에 따른 방출특성에 크게 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 즉, 건축자재로부터의 헥산, 톨루엔의 방출은 전반적으로 초기에 방출속도가 높고 시간이 지남에 따라 점차 줄어드는 경향을 보이고 있으나, 온돌마루로부터의 톨루엔 방출은 다른 양상을 보이는데 시간이 지남에 따라 방출속도가 오히려 증가하여 6시간 경과 후 최대값을 보인 뒤 점차 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 온돌마루에 함유되어 있는 톨루엔 발생원이 자재의 내부에 많이 존재하고 있기 때문에 시간이 경과함에 따라 방출속도가 증가했다가 다시 감소하는 경향을 보인 것으로 추정된다. 바닥재로부터의 VOCs 방출특성 실험결과를 종합하여 살펴보면, 온돌시스템에서 방출되는 고농도의 VOCs에 인체노출을 줄이기 위해서는 이사하기 전에 적어도 72시간 이상의 Bake-out 시간이 필요할 것이라 사료된다.
주제어 : 바닥재, 온돌마루, 접착제, 휘발성유기화합물, 방출시험

1. 서 론

에너지절감에 대한 인식이 높아짐에 따라 점차 건물이 밀폐화되고 있으며, 이로 인하여 실내에서 발생되는 오염물질에 대한 정확한 진단 및 이에 대한 제어가 대단히 중요한 문제로 대두되고 있다. 현대인들은 하루 중 80~90% 이상의 많은 시간을 실내에서 생활하는 것으로 조사되었으며,[1,2] 이는 실내의 환경조건이 인간의 건강과 매우 밀접한 관련이 있다는 것을 의미한다고 할 수 있다. 실내환경의 대표적인 문제로 신축 또는 개축된 건물에 입주한 후 뚜렷한 병명 없이 눈이 따금거리거나, 목이나 코가 아프거나, 두통, 구토 등이 나타나는 새집증후군(Sick Building Syndrome) 증상이 다수 보고되고 있으며, 새집증후군에 대한 연구가 널리 진행되고 있다.[3,4] 새집증후군의 원인으로는 다양한 인

† Corresponding author E-mail: sdkim@uos.ac.kr Tel: 02-2210-2453 Fax: 02-2242-4962

자들이 있을 수 있으나, 가장 널리 알려진 것이 건축자재나 가구, 가전제품 등에서 발생하는 휘발성유기화합물(VOCs, Volatile Organic Compounds)이다. 여러 연구자들은 신축 또는 개축건물에서 발생하는 VOCs의 농도는 대부분 공사과정과 사용된 건축자재로부터 방출된 VOCs로서, 일반적인 주거생활공간에서의 VOCs 농도보다 수십 또는 수백배에 이른다고 보고하고 있다.[5~7] 각국마다 주거의 형태가 다르기 때문에 VOCs의 발생농도에 있어서는 약간의 차이는 있을 수 있겠으나, 건축자재로부터 발생되는 VOCs의 종류는 비슷할 것으로 예상된다. Zuraimi 등은 싱가포르와 유럽의 사무실에서 발생하는 주요 VOCs 농도를 측정한 결과, 싱가포르의 건물에서는 헥산, 톨루엔, 자일렌, 나프탈렌이 비교적 높은 농도로 검출되었으며, 유럽의 건물에서는 헥산, 톨루엔, 메틸사이클로펜탄이 비교적 높은 농도로 검출되었다고 보고하고 있다.[8]

우리나라의 경우에는 난방을 위해 온돌을 사용하는 문화이기 때문에 외국의 주거환경과는 다른 특수한 상황에 놓여 있다. 그러므로 건축자재중 바닥재로부터의 VOCs 방출특성을 파악하는 것이 사람이 주거하는 동안 VOCs에의 인체노출을 최대한 줄일 수 있는 방안을 마련하는데 도움이 될 것이라 판단된다.

일반적으로 건축자재로부터 발생되는 VOCs를 측정하는 방법에는 크게 소재측정법, 데시케이터법, 방출챔버시험법, 현장측정법이 있다.[9] 그러나 소재측정법 및 데시케이터법은 건축자재에서 발생하는 화학물질의 성분분석은 가능한 반면 실제 환경조건과는 상이한 조건에서 실험이 진행되므로 시간에 따른 방출특성을 파악하기가 어려우며, 현장측정법은 현장의 환경인자들을 모두 고려할 수 있는 반면, 다양한 인자들로 인하여 오염원발생원을 파악하는 것이 어렵다. 이에 반해 방출챔버시험법은 제한된 환경조건이기는 하지만 건축자재에서 발생되는 오염물질의 농도 및 시간에 따른 방출특성을 알 수 있는 장점이 있다.[10]

이에 따라 본 연구에서는 바닥재로서 환경친화적인 측면에서 사용빈도가 높아지고 있는 온돌마루와 이를 시공하기 위한 접착제를 대상으로 방출챔버시험법에 근거하여 바닥재 혹은 혼합자재의 VOCs 방출 특성을 비교하였다.

2. 실험방법

건축용 바닥재(온돌마루, 접착제)로부터 발생되는 VOCs의 방출특성을 파악하기 위하여 사용한 방출챔버시험의 방법은 다음과 같다.

2.1. 실험재료

실험에 사용된 온돌마루는 국내의 신축공동주택이나 주거공간의 재시공시 가장 널리 사용되는 무늬목 장식 합판으로 된 A사의 제품을 사용하였다. 이 온돌마루는 실험 1개

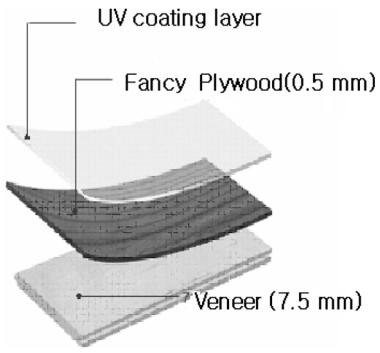


Fig. 1. Structure of plywood flooring.

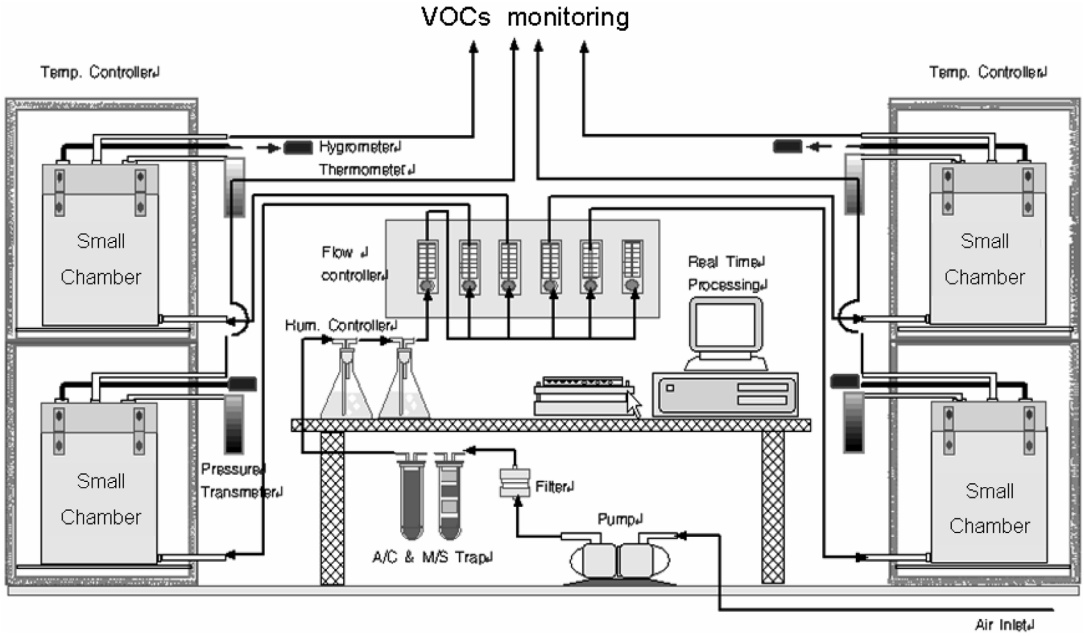


Fig. 2. Experimental setup to measure VOCs emission from plywood flooring and adhesive.

월 전에 만들어진 백참나무 제품으로서, Fig. 1에서 보여주고 있는 바와 같이 7.5 mm 두께의 참나무 무늬목에 0.5 mm의 고급합판을 접착제를 이용하여 붙이고, 상부에 UV코팅을 하여 약 160℃에서 압축시킨 제품이다. 또한 실험에 사용한 접착제는 B사에서 생산한 유성의 에폭시 접착제로서 친환경건축자재 인증마크(클로버 4)를 획득한 제품이다. 접착제 시험편의 경우에는 스테인레스판에 접착제의 무게가 300 g/m^{2}이 되도록 도포하여 준비하였다. 또한 시험편의 크기는 16 cm×16 cm로 제작하였으며, 실제 노출면적은 14 cm×14 cm이 되도록 하였다.

2.2. 실험장치 및 실험방법

바닥재로부터의 VOCs 방출실험을 위해 사용된 장치는 방출시험챔버, 공기정화장치, 온·습도 조절장치, 측정 및 분석장치로 구성되어 있다. 그 실험장치의 구성도를 Fig. 2에 나타내었다. HEPA필터, Molecular Sieve 및 활성탄필터를 거쳐 유입된 청정공기는 습도조절기에 의해 일정한 습도를 유지한 상태로 각 시험챔버로 공급된다. 시험챔버내에서의 공기온도를 일정하게 유지시키기 위하여 챔버를 대형항온조내에 위치시켰다. 시험챔버는 두께 1 mm, 지름 0.3 m, 높이 0.284 m로 전체용량은 0.02 m^{3}이며, 발생되는 VOCs의 흡착 및 반응을 최소화하기 위하여 Stainless Steel 재질로 제작하였다. 또한 챔버내부에서 발생할 수 있는 난류의 방지와 완전혼합을 위하여 챔버 하단부에 다공판을 설치하였다. 시험편은 다공판의 상단 중앙 지점에 크기가 동일한 SUS판을 놓고 그 위에 위치시켜 VOCs가 상부로 방출되도록 하였다. 방출된 VOCs는 Tenax-TA (60/80 mesh, Supelco, USA)가 250 mg 이상 충진된 스테인레스 흡착관(1/4 inch×9 cm, Perkin elmer, UK)을 이용하여 포집하고, 이를 열탈착시켜 GC/MS (GC - 6890N, Agilent, USA; Detector - 5975B, Agilent, USA)로 분석하였다.

시료의 채취는 한국공기청정협회 방출시험방법의 시료채취방법에 준하여 실시하였다. 바닥재로부터 방출되는 VOCs의 방출특성을 평가하기 위하여 농도변화가 클 것으로 예상되는 최초 1일까지는 2~6시간 간격으로 6회, 1일이 경과된 시점부터 1주일까지는 24시간 간격으로 4회, 1주 후부터는 1~3일 간격으로 3주 동안 총 17회를 측정하였다. 실내온도(25, 35, 40℃)를 VOCs 방출에 영향을 미치는 환경인자로 삼았으며, 상대습도를 50%로 고정하여 실험을 수행하였다. 실험에서 환기회수는 0.5회/hr로 하였으며, 이 때 챔버내에서의 레이놀즈수가 1,010(기류속도는 0.03~0.06 m/s)인 것으로 보아 유체가 층류상태를 유지하고 있음을 알 수 있다.

또한 바닥재가 시공이 된 후 바닥을 난방하는 실제 주거상황을 고려하여 Fig. 3과 같은 장치를 구성하여 바닥난방시의 VOCs 방출테스트를 수행하였다. 축소모형은 두께 1 mm, 가로 0.5 m, 세로 0.5 m, 높이 0.25 m로 전체용량 0.0625 m^{3}으로 만들었으며, 공동주택의 높이가 2.3 m라는 것을 감안하여 축소율을 정하였다. 재질은 상기와 같이 VOCs의 흡착과 반응을 최소화하기 위하여 Stainless Steel로 하였다. 바닥을 난방하기 위하여 열전달판을 설치하였으며, 주변기기에 전기가 통하지 않도록 열전달판의 상부에는 절연체를 하부에는 단열판을 장착하였다. 또한 절연체의 상부에 SUS판을 놓고 그 위에 접착제를 300 g/m^{2}로 균일하게 도포한 후 바닥재를 부착하였다(접착제와 바닥재의 두께는 Fig. 2의 실험에서와 동일함). 챔버내 바닥재의 표면온도는 온도조절장치를 이용하여 25, 35, 40℃로 조절할 수 있도록 하였다. 상기와 같이 구성된 실험챔버를 Fig. 2의 시스템 내 시험챔버 위치에 설치하고 상류측에서 공급된 청정공기를 급기구 측에 연결하고 배기구 측은 VOCs 모니터링 장치에 연결시켜 실험을 수행하였다. 급기구와 배기구는 직경 10 mm의 크기이며, 실험챔버내에서의 유체가 층류를 유지하도록 환기회수는 0.5회/hr(유량 : 0.032 m^3/hr)로 하였다. 방출되는 VOCs의 측정은 단일자재의 실험에서와 동일하게 하였다.

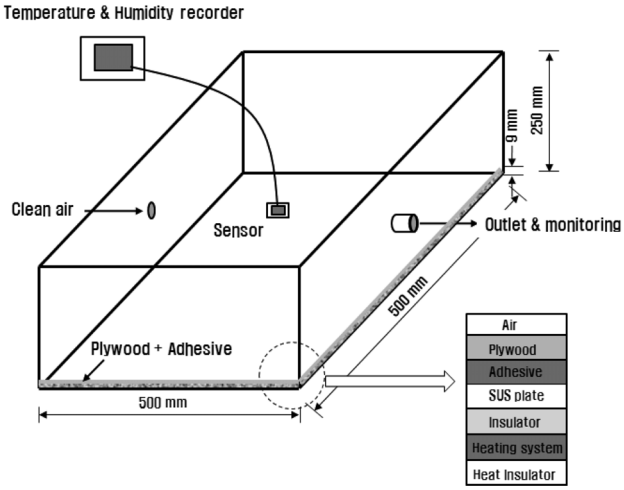


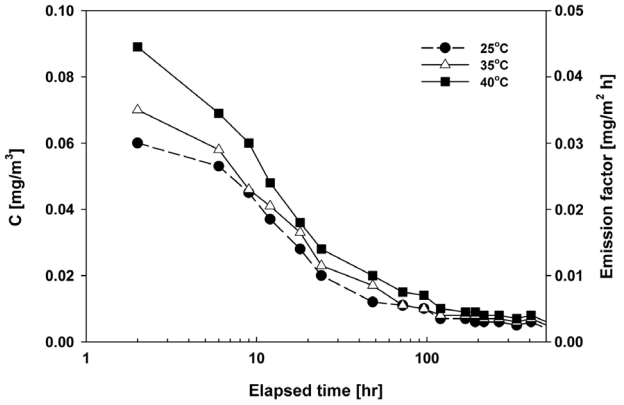
Fig. 3. Experimental chamber to measure VOCs emission from combined building materials (plywood flooring & adhesive).

3. 결과 및 고찰

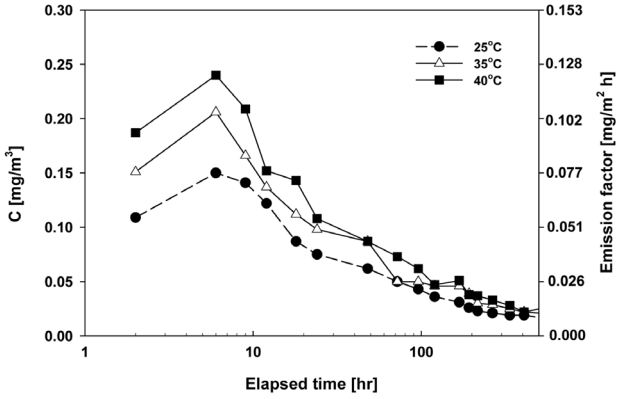
3.1. 단일자재로부터의 VOCs 방출특성

3.1.1. 온돌마루로부터의 방출특성

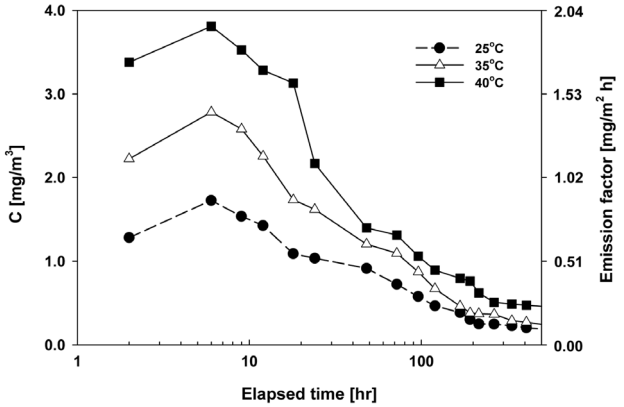
Fig. 2의 실험장치를 이용하여 시간경과 및 온도에 따라 온돌마루에서 방출되는 주요 VOCs (Hexane, Toluene 및 TVOC)의 실험결과를 Fig. 4에 나타내었다. 또한 VOC의 농도데이타와 환기회수, 챔버의 용적 및 노출되는 시편의 표면적을 고려하여 계산한 방출속도(Emission factor = C (VOC concentration in air)×환기회수×챔버의 용적÷노출되는 시편의 표면적)를 그래프의 오른쪽 축에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 시간에 따른 VOCs의 방출속도는 초기에 상대적으로 높게 나타나고, 시간이 지남에 따라 지수적으로 낮아짐을 알 수 있다. 특히 초기의 72시간(3일)까지의 VOCs의 감소율이 현격하게 나타나고 그 이후에는 감소율이 둔화되는 경향을 보인다. 이는 건축자재로부터의 VOCs 방출



(a) Hexane



(b) Toluene



(c) TVOC

Fig. 4. VOCs emission from plywood flooring over time at different temperature.

이 초기에 집중적으로 발생하고 그 이후에는 서서히 진행되고 있음을 보여준다.

온도에 따른 VOCs 농도변화를 살펴보면, 헥산, 톨루엔 모두 온도가 증가함에 따라 방출농도가 높아진다는 것을 알 수 있다. 그리고 각 성분별 방출농도를 살펴보면, 헥산은 온도와 상관없이 2시간 이내에 최대방출농도(0.06~0.09 mg/m^3)를 나타내었으며, 24시간 후에 최대치의 67%, 168시간(7일) 후에 최대치의 약 89%가 줄어든다는 것을 알 수 있다. 톨루엔의 경우에는 헥산과는 달리 6시간 후에 최대방출농도(0.15~0.24 mg/m^3)를 보이고 있으며, 24시간 후에는 25℃에서 최대치의 50%, 35℃에서 52%, 40℃에서 55%,

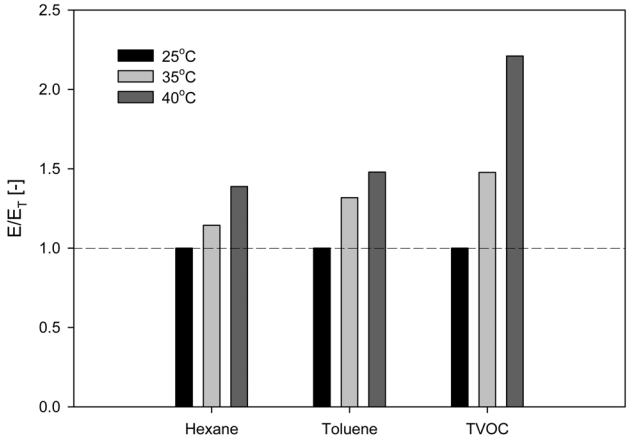


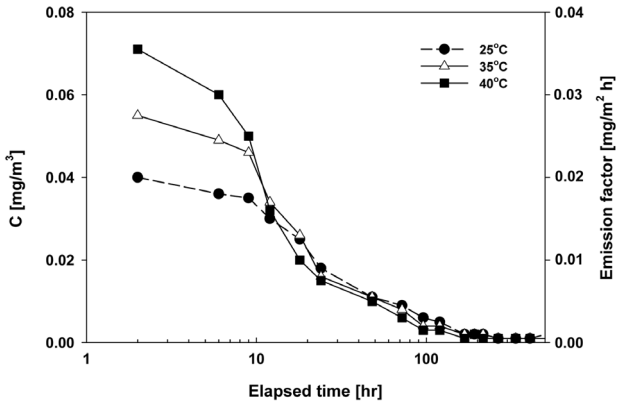
Fig. 5. Emission of Hexane, Toluene and TVOC at different temperature (normalized by each VOC emission at 25℃).

168시간 후에는 25℃에서 최대치의 79%, 35℃에서 78%, 40℃에서 79%가 줄어든다는 것을 알 수 있다. 또한 TVOC의 경우에는 톨루엔과 마찬가지로 6시간 후에 최대방출농도(1.73~3.81 mg/m^3)를 나타내었으며, 24시간 후에는 25℃에서 최대치의 40%, 35℃에서 42%, 40℃에서 43%, 168시간 후에는 25℃에서 최대치의 78%, 35℃에서 83%, 40℃에서 79%가 줄어든다는 것을 알 수 있다.

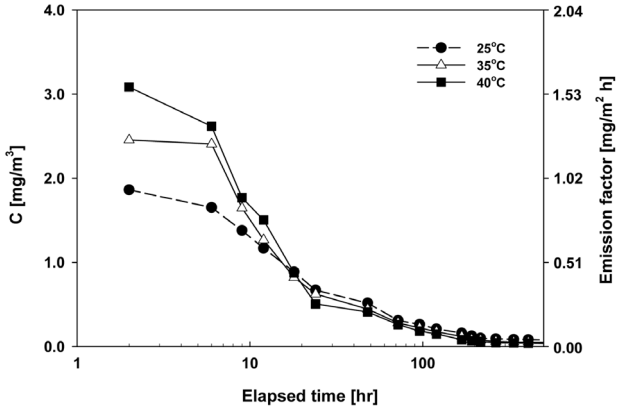
온도에 따른 VOCs의 방출속도 차이를 분석하기 위해 25℃에서의 방출량(E_T)를 기준으로 한 35℃와 40℃에서의 방출량(E)을 분석한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 온돌마루에서 방출되는 TVOC는 35℃에서는 25℃의 1.5배, 40℃에서는 2.2배 증가함을 알 수 있다.

3.1.2. 접착제로부터의 방출특성

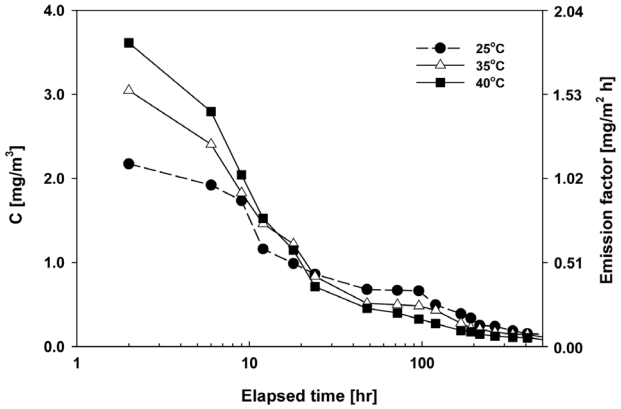
온돌마루와 동일한 방법으로 접착제에서 방출되는 주요 VOCs (Hexane, Toluene 및 TVOC)의 실험결과를 Fig. 6에 나타내었다. 온도에 따른 VOCs 농도변화를 살펴보면, 온돌마루와 마찬가지로 헥산, 톨루엔 모두 온도가 높아짐에 따라 방출농도가 높아진다는 것을 알 수 있다. 그리고 각 성분별 방출농도 실험결과, 헥산은 온도와 상관없이 2시간 이내에 최대방출농도(0.04~0.07 mg/m^3)를 나타내었으며, 24시간 후에는 25℃에서 최대치의 55%, 35℃에서 70%, 40℃에서 79%, 72시간(3일) 후에는 25℃에서 최대치의 78%, 35℃에서 86%, 40℃에서 92%가 줄어든다는 것을 알 수 있다. 톨루엔의 경우에는 온돌마루의 경우와는 달리 2시간 내에 최대방출농도(1.86~3.08 mg/m^3)를 보이고 있으며, 24시간 후에는 25℃에서 최대치의 64%, 35℃에서 75%, 40℃에서 84%, 72시간 후에는 25℃에서 최대치의 83%, 35℃에서 89%, 40℃에서 92%가 줄어든다는 것을 알 수 있다. TVOC의 경우에도 2시간 내에 최대방출농도(2.17~3.61 mg/ m^3)를 나타내었으며, 24시간 후에는 25℃에서 최대치의 61%, 35℃에서 73%, 40℃에서 80%, 72시간 후에는 25℃에서 최대치의 69%, 35℃에서 84%, 40℃에서 89%가 줄어든다는 것을 알 수 있다.



(a) Hexane



(b) Toluene



(c) TVOC

Fig. 6. VOCs emission from adhesive over time at different temperature.

위의 결과로부터 판단할 때 건축자재로부터의 헥산, 톨루엔의 방출은 전반적으로 초기에 방출속도가 높고 시간이 지남에 따라 점차 줄어드는 경향을 보이고 있었다. 다만 온돌마루로부터의 톨루엔 방출은 다른 양상을 보이는데, 시간이 지남에 따라 방출속도가 오히려 증가해서 6시간 경과 후 최대값을 보인 뒤 점차 감소하는 특성을 나타내고 있었다. 이는 접착제로부터 방출되는 톨루엔 농도가 온돌마루에서 방출되는 톨루엔 농도보다 10배 이상 높다는 점과 Fig. 1에서 설명한 바와 같이 온돌마루를 만드는데 있어서 일정량의 접착제를 사용하고 있다는 점으로부터, 접착제 내에 포함된 톨루엔 성분이 온돌마루로부터 확산 및 방출되는데

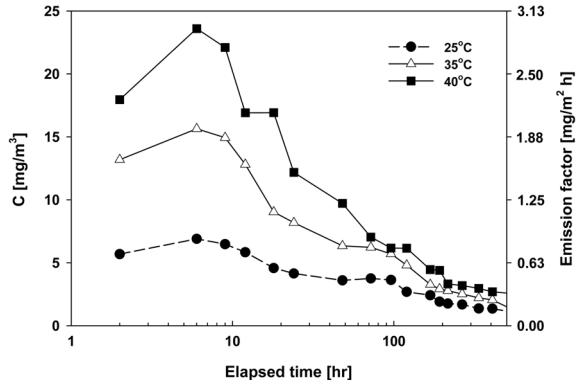


Fig. 7. TVOC emissions from combined building materials (plywood flooring and adhesive).

약간의 시간이 결려 6시간이 경과된 후 최대값을 보인 것으로 판단된다.

3.2. 혼합자재로부터의 VOCs 방출특성

Fig. 7은 Fig. 3에 제시한 시스템에서 실시한 접착제를 사용하여 바닥재를 시공한 혼합자재로부터 방출되는 TVOC의 방출특성을 나타낸 것이다. Fig. 3에 나타낸 실험장치에서 온돌마루와 접착제의 혼합자재로부터 방출되는 VOCs의 농도를 TVOC로 나타내어 온도와 경과시간의 함수로 나타낸 것이 Fig. 7이다. 온돌마루로부터 발생되는 TVOC의 방출특성(Fig. 4(c))과 아주 유사한 경향을 나타내고 있다는 것을 알 수 있다. 6시간 후에 최대방출농도(6.90~23.59 mg/m^3)를 나타내었으며, 24시간 후에는 25℃에서 최대치의 40%, 35℃에서 48%, 40℃에서 48%, 168시간 후에는 25℃에서 최대치의 65%, 35℃에서 79%, 40℃에서 81%가 줄어든다는 것을 알 수 있다.

단일자재의 TVOC 방출속도(r_P-온돌마루로부터의 방출속도, r_A-접착제로부터의 방출속도)를 합하여 혼합자재의 TVOC 방출속도(r_{P+A}-온돌마루와 접착제를 함께 시공한 경우의 방출속도)와 비교한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 실험조건 중 저온이라 할 수 있는 25℃에서는 실험초기부터 측정기간 전반에 걸쳐 혼합자재로부터 방출되는 TVOC가 단일자재의 TVOC농도의 합보다 40~85%로 낮게 나타났으나, 고온이라 할 수 있는 40℃에서는 전반적으로 유사한 수준의 방출속도를 나타내고 있음을 알 수 있었다. 이는 접착제에서 1차 방출된 VOCs성분이 바닥재에 의해 2차적으로 방출을 방해받고 있는 것으로 판단되는데 온도가 증가하게 되면 바닥재에 의한 방해효과가 줄어들기 때문인 것으로 나타났다.

4. 결 론

건축자재 중 온돌마루와 접착제로부터 방출되는 VOCs의 특성을 파악하기 위해 단일자재로부터의 방출특성 실험과 혼합자재로부터의 방출특성 실험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

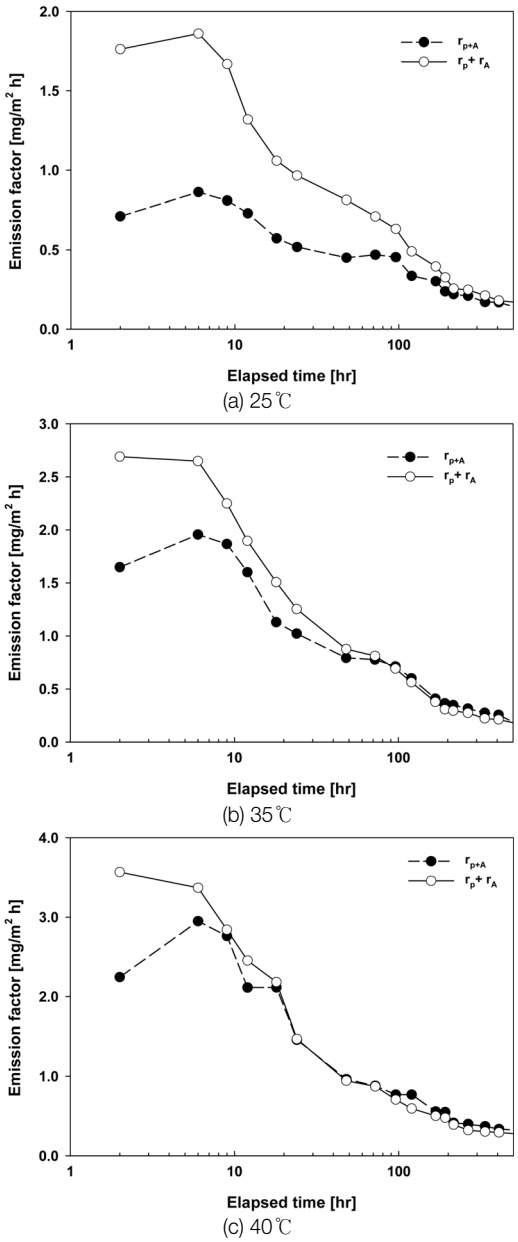


Fig. 8. Comparison of the sum of TVOCs emission factors from two single materials (plywood flooring and adhesive) and TVOC emission factor from combined one.

1) 단일자재 방출시험 결과로부터, 헥산의 경우에는 온돌마루에서 발생되는 농도와 접착제에서 발생되는 농도가 비슷한 반면, 톨루엔의 경우에는 온돌마루에서보다 접착제에서 10배 이상 높은 농도로 발생된다는 것을 알 수 있다.

2) 온도에 따른 VOCs 방출에 대해서는 온돌마루, 접착제 모두 온도가 높아질수록 방출되는 농도가 높아지고 방출속도 또한 빨라진다는 것을 알 수 있다. 경과시간에 대해서는 온돌마루에서 방출되는 헥산, 접착제에서 방출되는 헥산, 톨루엔은 시간이 경과함에 따라 방출농도 및 방출속도가 낮아지는 경향을 보이는 반면, 온돌마루에서 방출되는 톨루엔은 방출초기보다 6시간 후에 최대치를 보이고 이후 점점 낮아지는 경향을 보였다.

3) 혼합자재로부터의 TVOC 방출속도와 단일자재(온돌마루와 접착제)로부터의 TVOC 방출속도를 합한 값을 비교한 결과, 온도가 높아짐에 따라 방출속도의 차이가 줄어든다는 것을 알 수 있다. 또한 저온에서는 혼합자재의 방출속도가 단일자재의 방출속도의 합보다 낮게 나타나고 있는데, 이는 접착제로부터 1차 방출된 VOCs가 온돌마루에 의해 방출이 지연되고 있으나 고온에서는 온돌마루에 의한 방출지연 효과가 적은 것으로 나타나 초기 방출속도를 높이기 위해서는 실내를 고온으로 유지해야 할 것으로 판단된다. 이러한 결과를 종합해 볼 때, 바닥재로부터 발생되는 VOCs를 효과적으로 제어하기 위해서는 적어도 72시간 이상의 Bake-out 시간이 필요할 것이라 사료된다.

KSEE

참고문헌

1. 유형규, 박진철, 이언구, "건축자재 적용방안에 따른 실내 공기오염물질 방출량 비교 연구," 대한건축학회논문집 계획계, **22**(5), 247~254(2006).
2. Haghighat, F., Lee, C.-S. and Ghaly, W. S., "Measurement of diffusion coefficients of VOCs for building materials : review and development of a calculation procedure," *Indoor Air*, **12**, 81~91(2002).
3. Redlich, C. A., Sparer, J. and Cullen, M. R., "Sick-building syndrome," *THE LANCET*, **349**, 1013~1016(1997).
4. Takeda, M., Saijo, Y., Yuasa, M., Kanazawa, A., Araki, A. and Kishi, R., "Relationship between sick building syndrome and indoor environmental factors in newly built Japanese dwellings," *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, **82**(5), 583~593(2009).
5. Brown, S. K., "Chamber assessment of formaldehyde and VOC emissions from wood-based panel," *Indoor Air*, **9**(3), 209~215(1999).
6. Rothweiler, H., Wager, P. A. and Schlatter, C., "Volatile organic compounds and some very volatile organic compounds in new and recently renovated buildings in Switzerland," *Atmos. Environ.*, **26**(12), 2219~2225(1992).
7. Chuck Y. and Crump, D., "A review of the emission of VOCs from polymeric materials used in buildings," *Build. Environ.*, **33**(6), 357~374(1998).
8. Zuraimi, M. S., Roulet, C. A., Tham, K. W., Sekhar, S. C., Cheong, K. W. D., Wong, N. H. and Lee, K. H., "A comparative study of VOCs in Singapore and European office buildings," *Building and Environment*, **41**(3), 316~329(2006).
9. 조완제, "건축자재의 VOCs 방출 시험방법 및 방출특성," 설비저널, **31**(12), 9~13(2002).
10. 이석조, 장성기, 조용성, 정경미, 정기호, "소형챔버법을 이용한 건축자재 중 벽지, 페인트 및 접착제의 VOCs 방출특성 평가," 한국대기환경학회지, **21**(2), 191~204(2005).