

모듈러 목업주택의 실내공기질 실측조사 연구

A Study on Measurement of the Indoor Air Quality in Modular Mock-up Housing

전주영¹ · 김종엽² · 방종대³ · 김갑득⁴

Chu-Young Chun¹, Jong-Yeob Kim², Jong-Dae Bang³ and Gap-Deug Kim⁴

(Received September 23, 2015 / Revised October 29, 2015 / Accepted October 29, 2015)

요 약

본 연구는 다변화 되는 건설환경에서 모듈러 주택에 대한 관심이 높아지고 있어 모듈러 목업 주택을 대상으로 신축시 실내공기질 현황을 측정하였다. 붙박이 가구가 미설치된 세대(101호)와 붙박이 가구가 설치된 세대(102호), 2세대를 대상으로 시간경과에 따라 3차 측정을 실시하였다. 1차는 마감 및 붙박이 가구 설치 직후 측정하였으며 2차는 베이킹아웃 실시 이후, 3차는 약 2.5개월(77일) 이후 측정하였다. 측정결과 1차 측정시 붙박이 가구 설치세대가 오염물질 방출농도가 높았으나 톨루엔의 경우를 제외하고 모두 권고기준 이하로 나타났다. 3차 측정시에는 톨루엔과 스티렌을 제외하고 두세대가 유사한 방출량으로 나타났으며 두세대 모두 미미한 수준으로 방출량이 낮아졌다. 이는 측정세대 모듈이 적어(14.7m²) 베이킹아웃 및 환기에 의한 영향이 크게 나타난 것으로 판단되며 이를 통해 오염물질이 외부로 방출되어 저감된 것으로 판단된다. 일반 공동주택의 입주시점을 고려한다면 모듈러 주택의 경우도 모두 실내공기질 권고기준 이하로 나타날 것으로 판단되며, 가구에 의한 영향은 톨루엔이 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 향후에는 모듈조합을 통해 중형 이상 규모 모듈러 주택에 있어서 가구설치 여부에 따른 상관관계를 살펴 볼 필요성이 있을 것으로 판단된다.

주제어 : 모듈러주택, 실내공기질, 폼알데하이드, 휘발성유기화합물

ABSTRACT

Recently, It has been much interest in modular housing construction. so, The purpose of this study was to investigate the characteristics of the indoor air quality in modular mock-up housing. We measured indoor air quality(formaldehyde, benzene, toluene, ethylbenzene, xylene, styrene) of two modular mock-up units that built-in furniture is installed and uninstalled. As a result, the pollutants of built-in furniture installed unit were emitted more than built-in furniture uninstalled unit. But after bake-out and ventilation, emission concentrations of two modular mock-up units were similar and were below Indoor Air Quality recommendation standards. Built-in furniture is likely to affect the emission concentration of toluene

Key words : Modular Housing, Indoor Air Quality, HCHO, VOC

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

2000년 초반부터 새집증후군이 화두가 되고 일반인들의 90% 이상이 대부분의 시간을 실내에서 생활하게 되면서 건물 실내공기질에 대한 관심은 지속적으로 증가하게 되었다. 2003년 환경부의 「다중이용시설 등의 실내공기질 관리법」이 제정되고 공동주택의 실내공기질의 문제가 많은 이슈화가 되

었다. 또한 공동주택에서의 재택근무, 홈쇼핑 등 주택 거주환경의 다양한 성능으로 진화되면서 주택의 실내공기질에 대한 관심은 지속적으로 증가하고 있는 실정이다.

주택건설에 있어서는 건설환경의 다변화와 더불어 기존의 노동집약적인 습식공법 중심의 주택건설에서 기술집약적이고 사용자의 다양한 요구성능에 대응이 용이하고 건설기간 단축이 가능한 건식공법 중심의 공장생산방식인 모듈러 주택에 대한 관심이 높아지고 있다. 이에 따라 모듈러 주택의 공

1) 한국토지주택공사 토지주택연구원 수석연구원(교신저자: jyechun@lh.or.kr)

2) 한국토지주택공사 토지주택연구원 연구위원

3) 한국토지주택공사 토지주택연구원 선임연구위원

4) 포항산업과학연구원 수석연구원

장 생산시 성능기준에 대한 규정이 마련되어 있으며 「주택건설기준 등에 관한 규칙」(제13조)에서 공업화 주택의 성능 및 생산기준에 대하여 제시하고 있다. 규정은 크게 성능기준과 생산기준으로 나뉘어져 있으며, 성능기준은 단독주택과 공동주택으로 분류하고 있다. 성능기준은 구조안전성능, 내화 및 방화성능, 피난안전성능 및 추락방지성능, 환기성능 및 기밀성능, 열환경성능, 음환경성능, 내구성능으로 구분하여 제시되고 있다. 상기 기준은 모듈러 주택의 공장 생산시의 단위모듈에 대한 기준으로서 실내공기질에 대한 평가 및 기준은 일반 공동주택 건설기준과 동일하게 적용 받는다.

따라서, 본 연구에서는 시범 시공된 모듈러 주택을 대상으로 신축 시 불박이 가구 설치 유무에 따른 실내공기질을 측정 분석하였으며 이를 통하여 실내공기질 권고기준 및 일반적 공동주택 실태와 비교하여 현황을 파악하고자 하였다.

1.2 연구범위 및 방법

연구범위는 2013년 현장조립이 완료된 신축 모듈러 목업 주택을 대상으로 「다중이용시설등의 실내공기질 관리법」에 의하여 실내공기질을 측정하였다. 표 1은 ‘실내공기질공정시험기준¹⁾’의 실내공기질 측정방법이다. 본 연구에서는 상기 기준에 준하여 실내공기질을 측정하였다. 측정항목으로는 폼알데하이드, 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 스티렌 6개 측정항목으로 하였다. 시료의 채취는 단위모듈의 거실 중앙부에서 실시하였으며, 벽으로부터 최소 1m 이상 떨어진 위치의 바닥면으로부터 1.2~1.5m 높이를 기본 측정점으로 하였다. 세대내 기계환기시스템이 설치되어 있어, 실내공기질 측정을 위해 가동을 중지하였으며 급배기구로부터 최소 1m 이상 떨어진 곳에서 측정하였다.

표 1. 실내공기질 측정방법

시료채취방법	시료채취조건	
	온도조건	채취시간
30분 환기 → 5시간 밀폐 → 시료채취 2회	실내온도 20℃ 이상	오후1시~5시

1.3 선행연구 고찰

신축 공동주택의 실내공기질 실측조사연구에 대한 기존 연구는 「다중이용시설 등의 실내공기질 관리법」(2003년)이 제정된 이후 다수의 조사연구가 있었으며 녹색건축 인증제도와 현재는 동법에 포함되었지만 공동주택성능인정제도가 시행되면서 마감재를 중심으로 친환경자재의 개발이 활발히 이루어졌다. 이후 신축 공동주택의 실내공기질은 현저히 좋아졌고 신축공동주택의 실내공기질 측정이 의무화 되면서 실내

공기질 실태조사에 대한 연구는 줄어들고 있는 실정이다. 주택을 대상으로 한 실내공기질 조사분석 연구를 살펴보면 다음과 같다.

김재권 등(2012)²⁾은 2012년 9월 3일 신축공동주택을 대상으로 저층, 중층, 고층으로 나누어 A형(59m²), B형(114m²)의 입주 전 폼알데하이드 농도를 측정하였다. A형의 경우 293~529 μg/m³으로 평균 364μg/m³로 나타났으며 B형의 경우 495~783 μg/m³으로 평균 667μg/m³으로 나타났다. B형의 경우 면적이 넓고 실내 불박이장이 많아 A형보다 농도가 높게 나타났으며 층에 대한 영향은 변별력있게 나타나지 않았으며 실내온도가 올라감에 따라 폼알데하이드 농도가 높아지는 것으로 나타났다.

전주영 등(2014)³⁾은 2012년 입주하는 전국의 43개 공동주택을 대상으로 계절별 특성을 파악하였다. 모든 단지가 권고기준을 만족하였으며, 실내온도가 상승하는 6월~9월의 폼알데하이드 방출량 농도가 가장 높게 나타났다. 폼알데하이드 평균 방출농도는 28~106μg/m³으로 일부단지에서 172μg/m³의 가장 높은 방출량을 보였다. 톨루엔의 경우 평균 방출량 82~453μg/m³으로 나타났으며 일부 단지에서 791μg/m³까지 상승하였으나 모두 권고기준을 만족하였다.

윤재옥(2013)⁴⁾은 경기도의 신축공동주택을 16세대를 대상으로 2012년 9월 7일~9월 9일(3일) 동안 휘발성 유기화합물 및 폼알데하이드를 실측하였으며, 저층, 중층, 고층의 주택의 세대위치에 따른 영향을 조사하였다. 폼알데하이드 평균농도는 527.3μg/m³, 벤젠 1.8μg/m³, 톨루엔 101.9μg/m³, 에틸벤젠 9.5μg/m³, 자일렌 9.4μg/m³, 스티렌 5.5μg/m³으로 나타나 폼알데하이드 농도가 권고기준을 넘었다. 실내 체적이 많은 전용면적 114m²가 59m²보다 폼알데하이드 방출량이 많이 나타났으며, 침기량과의 관계에서는 침기량이 많은 59m²세대가 침기량이 적은 114m²세대보다 농도가 적게 나타났다. 또한, 실내온도가 높은 세대의 경우 폼알데하이드 농도가 높게 나타났으며, 휘발성 유기화합물의 농도가 높은 세대에서는 폼알데하이드 농도도 높게 나타나 상관관계가 큰 것으로 분석하였다.

함진식(2012)⁵⁾은 신축된 공동주택 1세대(90m²형)를 대상으로 폼알데하이드 농도의 발생특성과 공기청정기 가동, 광촉매 시공 및 창호개방에 따른 폼알데하이드 농도저감 특성을 측정하였다. 실내공기질 공정시험법에서는 실내를 30분 이상 환기시킨 후 5시간 동안 밀폐 후 30분동안 실내공기질

2) 김재권 등(2012), “위성도시의 신축공동주택 실내공기질 실측에 관한 연구”, 「대한건축학회 추계학술발표대회 논문집」, 32(2): 305~306
 3) 전주영 등(2014), “신축 공동주택의 실내공기질 계절별 실측 조사연구”, 「LHI Journal」, 4(4)
 4) 윤재옥(2013), “입주전 신축 공동주택의 휘발성유기화합물 및 폼알데하이드 실측에 관한 연구”, 「대한건축학회 논문집」, 29(7): 265~272
 5) 함진식(2012), “신축 공동주택의 폼알데하이드 농도 발생특성과 저감대책에 관한 연구”, 「대한건축학회논문집」, 28(9)

1) 환경부(2010), 「실내공기질공정시험기준」, 환경부고시 제2010-24호

을 측정토록 되어있으나 밀폐 후 1시간 간격으로 폼알데하이드 농도를 측정하여 24시간 변화량을 살펴보았다. 측정 개시 6시간 후의 농도가 실내공기질 공정시험법에 준하는 농도에 해당된다. 거실의 경우 6시간 후의 농도는 0.25ppm으로 국내 환경기준 0.1ppm보다 약 2.5배, 내실의 경우 6시간 경과 시 0.73ppm으로 7.3배에 달하는 것으로 나타났다. 24시간 측정 결과로서는 낮 시간의 온도가 높은 오후에 가장 높아진 뒤 서서히 줄어드는 것으로 나타났다.

이상형 등(2011)은⁶⁾ 신축 공동주택에 적용되는 마감재에 따른 실내공기질의 영향을 평가하고 마감자재 적용에 따른 실내공기질 개선효과를 현장의 4개 세대(84.38㎡)를 대상으로 시공완료 이후 45일이 경과된 시점에서 실내공기질을 측정 분석하였다. 측정결과 폼알데하이드 29.4~86.5µg/m³, 톨루엔 96.2~616.1µg/m³으로 나타났다. 실내 휘발성유기화합물 방출과 관련해서는 가구재(MDF)의 표면마감방법에 따라 방출량의 상당한 차이가 발생하는 것으로 나타났다.

이상의 신축 공동주택의 실내공기질에 대한 실측조사연구를 분석해보면 폼알데하이드의 방출량이 휘발성 유기화합물의 방출량보다 권고기준을 넘는 경우가 있는 것을 알 수 있었으며, 이는 세대의 면적 및 불박이 가구의 영향이 있는 것으로 나타났으며, 온도에 의해서도 오염물질 방출량이 상승하는 것을 알 수 있었다.

이에 모듈러 주택에서는 세대 면적이 동일하므로 불박이 가구의 설치 유무 및 시간경과에 따른 오염물질 발생 추이를 분석하여 모듈러 주택 실내공기환경 성능의 기초자료로 활용하고자 하였다.

2. 신축 공동주택 실내공기오염물질 관련 제도

2003년 「다중이용시설 등의 실내공기질 관리법」이 개정되면서 건축자재 측면에서는 오염물질을 다량으로 방출하는 건축자재에 대하여 환경부장관고시로 사용제한을 하고 있다. 실내공기질 측면에서는 공동주택의 경우는 새집증후군을 개선시키기 위하여 신축 공동주택의 실내공기질을 대상으로 하여 관리하고 있으며 다중이용시설에 있는 유지기준은 없으며 권고기준이 규정되어 있으며 입주 전 실내공기질 측정을 통한 주민공고와 행정기관 제출의 의무가 있는 실정이다.

2.1 오염물질 방출 건축자재 사용제한 기준

환경부의 「다중이용시설등의 실내공기질 관리법」에서 오염물질을 일정기준이상 방출하는 건축자재에 대하여 오염물질방출 건축자재를 고시(환경부장관)하고 있으며 다중이용

시설을 설치하거나 개보수를 할 경우에 고시된 오염물질방출 건축자재를 사용금지토록 규정하고 있다. 표2는 건축자재에서 방출되는 오염물질 방출량 사용제한 기준을 나타낸다.

표 2. 오염물질 방출 건축자재 사용제한 기준

[단위: mg/m³·h]

구분	폼알데하이드	총 휘발성 유기화합물	톨루엔
접착제	0.12	2.0	0.08
페인트	0.12	2.5	0.08
실란트	0.12	1.5	0.08
퍼 티	0.12	20.0	0.08
일반자재	0.12	4.0	0.08

2.2 신축공동주택 실내공기질 권고기준

100세대 이상의 신축공동주택의 경우는 건설주체가 시공이 완료된 주택의 실내공기질을 측정하여 측정결과를 해당 행정기관에 제출하고 입주 개시 3일 전부터 60일간 입주민이 잘 볼 수 있는 곳에 공고하도록 되어있다. 또한 신축공동주택의 새집증후군을 개선하여 쾌적한 실내공기질을 유지하기 위해 실내공기질 권고기준을 표 3과 같이 규정하고 있다.

표 3. 신축공동주택 실내공기질 권고기준

[단위: µg/m³]

구분	권고기준
폼알데하이드	210
벤젠	30
톨루엔	1,000
에틸벤젠	360
자일렌	700
스티렌	300

2.3 건강친화형 주택 건설기준

국민의 건강과 쾌적한 주거환경을 조성하기 위하여 새집증후군을 저감하고자 「청정건강주택 건설기준」(국토부)이 제정(2010.12)된 이후, 500세대 이상의 주택 신축 및 리모델링의 사업승인 대상사업으로 확대 및 일부항목의 의무기준화 등의 변경을 통하여 「건강친화형 주택 건설기준」(2013.12)이 개정되었다. 동 기준에 의하며 최소기준 충족 및 권장기준 중 2개 항목에 적합한 주택을 건강친화형 주택으로 규정하고 있다. 건강친화형 주택 건설기준의 최소기준과 권장기준은 다음 표 4와 같다.

6) 이상형 등(2011), “신축 공동주택에서 마감재 적용에 따른 실내공기질 개선 방안”, 「대한건축학회 논문집」, 27(7): 249~259

표 4. 건강친화형 주택 건설기준

건강친화형 주택 건설기준	
□ 최소기준	
1. 친환경건축자재의 적용	
1.1 실내공기오염물질 저방출자재의 적용	
1.2 실내마감용으로 사용되는 도료의 납(Pb) 등 유해원소 함유량	
2. 플러쉬아웃(Flush out)의 시행	
3. 효율적인 환기성능	
4. 환기설비의 성능검증	
5. 친환경생활제품의 적용	
5.1 빌트인 가전제품의 성능평가	5.2 붙박이 가구의 성능평가
6. 시공관리기준의 적용	
6.1 일반 시공관리기준	6.2 접착제 시공관리기준
6.3 유해화학물질 확산방지를 위한 도장공사 시공관리기준	
7. 관리자 및 입주자 사용설명서 제공	
7.1 플러쉬아웃 방법	7.2 환기설비 필터교환시기 및 방법
7.3 결로방지를 위한 입주자 생활행위	
□ 권장기준	
1. 흡습습건축자재의 적용	3. 항곰팡이 건축자재의 적용
2. 흡착 건축자재의 적용	4. 항균건축자재의 적용

3. 신축 공동주택 실내공기질 현장측정

3.1 현장측정 개요

실내공기질 측정 대상인 천안에 건설된 모듈러주택의 단위모듈은 다음 그림 1과 같다. 총 3층으로 구성되어 있으며, 1층과 2층은 각 층마다 단위모듈(14.7㎡, 7,000mm×2,100mm)로 설치된 2개 세대가 있으며, 3층은 단위모듈 2개를 통합한 모듈이 시공되어 있다. 기준에 의해 실내공기질 측정을 위해서는 거실장, 주방 싱크장, 환관 신발장 등의 가구류가 모두 설치되어 있는 완성된 세대에서 측정을 해야 한다. 대상 모듈러 목업주택은 1층 한개 세대(102호)만 가구류가 모두 설치되어 102호를 대상으로 모듈러 주택의 실내공기질을 측정하였으며, 비교세대로서 가구류가 설치되지 않은 101호를 동시에 측정하였다.

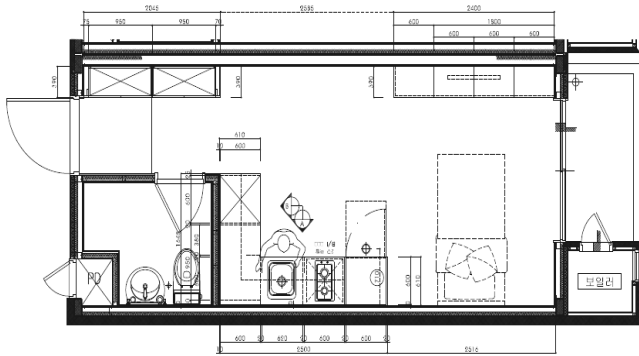


그림 1. 단위세대 모듈

측정 항목은 실내공기질 시험기준에 따라 폼알데하이드, 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 스틸렌으로 6개 항목을 측정하였다. 가구 반입 후 1차 측정을 실시하였으며, 베이크 아웃을 시행 이후 2차, 3차 측정하여 실내공기질 변화추이를 분석하였다. 측정대상 목업 및 단위세대는 그림 1과 같으며 측정 개요는 표 5와 같다. 목업 측정현장 및 측정모습은 표 6과 같다.

표 5. 측정 일시 및 내용

측 정		One module Type	비고
1차측정	2012.11.20	101호	가구마감재 반입 직후
		102호	
베이크아웃	2012.11.26 ~ 11.30	101호	베이크아웃 및 환기
		102호	
2차측정	2012.12.11	101호	-
		102호	
3차측정	2013.02.07	101호	-
		102호	

표 6. Mock-up 현장 및 측정 모습



3.2 단위세대 마감재

세대내 시공된 마감재료 기준은 표 7과 같다.

표 7. 실내 마감재료 기준

구분	바닥	걸레받이	벽	천정	
102	거실	T3 PVC우드 데코타일 친환경수성 접착제	PVC몰딩 친환경수성 접착제	벽지 친환경수성 접착제	천정지(벽지) 친환경수성 접착제
	화장실	도자기타일		도자기 타일	-
	주방	거실과 동일	PVC 몰딩	도자기 타일	-

모든 마감재는 친환경건축자재(HB 최우수등급)가 적용되었으며, 붙박이가구가 설치된 세대(102호)의 주방 싱크대 및 신발장, 수납장, 장식장의 경우 모두 E0 등급의 친환경가구재(MDF)로 제작되었다.

3.3 측정 및 분석기기

측정 및 분석방법은 ‘실내공기질공정시험기준’(환경부)에 따라 실시되었으며 적용된 측정기기 및 분석장비는 다음 표 8과 같다. 측정시기 이외의 기간에는 의도적 환기(세대내 기계환기장치 가동 및 창문을 통한 자연환기)는 실시하지 않았으며 침기에 의한 영향만이 두세대 동일하게 작용하였다.

3.4 베이क्र아웃 방법

베이क्र아웃은 3일간 실시하였으며 2일은 환기를 실시하였다. 베이क्र아웃 절차는 다음 표 9와 같다. 1차 측정 시에는 마감재 시공이 완료된 시점의 바로 익일에 실시되었으며, 마감재 시공 완료 후 베이क्र아웃을 실시(72시간)하였으며 직후 2일간 환기를 실시하여 오염물질을 배출시켰다. 베이क्र아웃 실시 후 2차에 걸쳐 실내공기질을 측정하여 오염물질 저감 경과를 측정하였다.

표 8. 측정기기 및 분석방법


구분	측정기기 및 분석기기	
펌프		에어펌프 (Chematec, Denmark) 
폼알데하이드	오존 스크리버 DNPH 카트리지 	액체크로마토그래프 (HPLC) 
휘발성 유기화합물	Tenax TA 튜브 	가스크로마토그래프 (GC-MS) 

표 9. 베이क्र아웃 절차

구분	내용
1일	실내온도 23 ~ 30℃ 유지
	- 세대내로 들어가면 바닥의 보양지를 제거하고, 발코니 새시 창과 발코니측 모든 방의 창문을 닫음 - 주방가구, 신발장, 주방 싱크대의 문 및 서랍은 완전 개방 - 거실에 있는 온도조절기 조절버튼으로 28℃에 맞춤 - 전면발코니 샷시문을 약 5cm정도 열어놓음 - 세대 환기장치 및 화장실 환기팬 가동
2일 ~ 3일	- 실내온도 30℃ 이상 유지
	- 발코니 새시 창, 창문이 닫혀있는지 확인하고 주방가구, 수납장고 문은 열려있는지 확인 - 거실에 있는 온도조절기 조절버튼으로 28℃ 이상 맞춤 - 전면발코니 새시문을 약 5cm정도 열어놓음 - 세대 환기장치 및 화장실 환기팬을 가동
4일 ~ 5일	- 발코니 새시문 및 현관문을 활짝 열고 맞통풍을 유도하여 세대내 전반환기를 실시
	- 세대 환기장치 및 화장실 환기팬을 가동
관리사항	- 작업 중 남은 폼알데하이드 및 콘크리트 유해물의 방출을 위해 앞,뒤 발코니 창문을 5cm 열고 방문, 가구문 및 서랍장을 전부 개방하고 화장실 및 주방 배기팬은 저속가동 함 - 베이क्र아웃으로 인한 화재(도배터짐)가 발생할 수 있으므로 동절기에는 온도를 점차적으로 올려 실시

4. 측정결과 및 분석

대상건물의 실내공기질 측정은 1, 2, 3차에 걸쳐 수행하였다. 1차 측정의 경우, 실내에 가구 및 싱크대를 반입한 직후에 측정되었다. 측정 시 일시적으로 톨루엔이 권고기준 이상이었으나 이는 일반적인 공동주택 측정환경은 아니라고 할 수 있으며 일반적으로는 공동주택 마감 및 가구반입 후 베이क्र아웃 등 환기 실시 후 입주 전까지 1~2개월이 소요되며 실내공기질 측정은 입주시점에 근접하여 측정하며 입주민 공고를 실시하게 된다. 본 실험에서는 베이क्र아웃 실시 후 2차 측정으로 102호를 측정하였으며, 3차까지 측정한 결과 모든 실내공기질 항목이 두세대 모두 권고기준 이하로 나타났다. 측정결과는 다음의 표 10 및 그림 2와 같으며 측정된 결과를 오염물질 발생원 및 기간별로 나타낸 것이다.

표 10. 실내공기질 측정결과

측정일	측정대상	휘발성유기화합물					폼알데하이드
		벤젠	톨루엔	에틸벤젠	자일렌	스티렌	
공동주택 권고기준		30	1,000	360	700	300	210
1차 측정: 마감재 반입 직후 ('12.11.20)	101호	3	96	35	76	21	37
	102호	3	1,324	165	284	139	66
베이क्र아웃 실시 ('12.11.26~11.30) + 2일 환기 (11.29~11.30)							
2차 측정: ('12.12.11)	102호	5	815	291	323	137	66
3차 측정: ('13.02.07)	101호	1	88	16	33	5	29
	102호	2	198	10	36	29	30

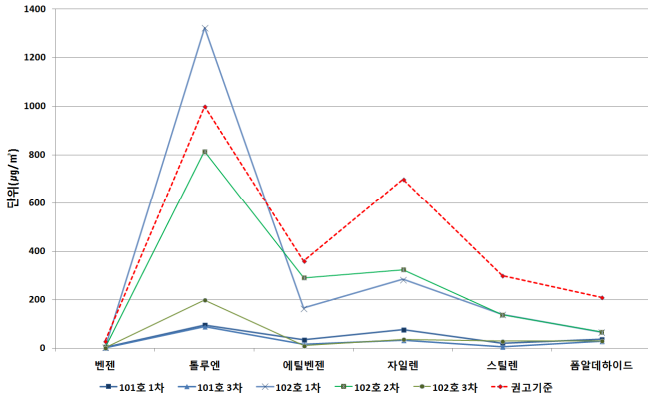


그림 2. 실내공기질 측정결과

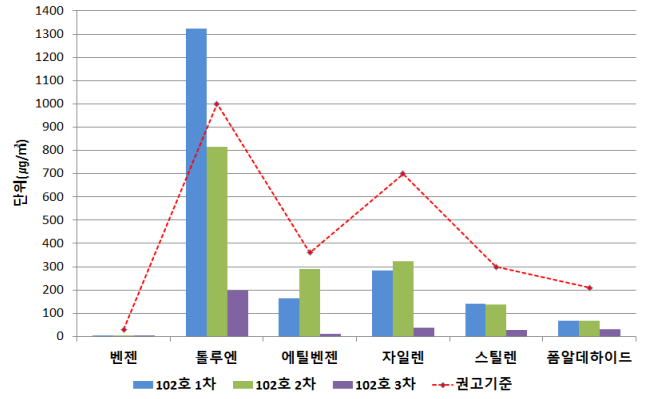


그림 4. 실내공기질 측정결과(102호)

1차 측정은 싱크대 및 신발장 등 붙박이 가구가 설치된 직후 측정하였으며, 1차 측정 일주일 후 5일 동안 베이커아웃을 실시하고 10일 후 2차 측정을 실시하였다. 비교세대로 붙박이 가구를 설치하지 않은 세대(101호)를 포함하여 베이커아웃 이후 약 2개월 후(67일)에 3차 측정을 실시하였다. 측정 시 실내온도는 실내공기질 공정시험방법에 의한 실내공기온도를 20℃ 이상 유지하기 위해 난방을 실시하였다.

붙박이가구 설치가 일반 공동주택과 동일하게 설치된 세대(102호)의 경우 측정결과는 그림 4와 같다. 1단계 측정결과는 벤젠 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 톨루엔 1,324 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 에틸벤젠 165 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 자일렌 284 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 스틸렌 139 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 폼알데하이드 66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 공동주택 권고기준과 비교하여 톨루엔 방출량만이 1,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 기준을 상회하였고 다른 오염물질은 권고기준 이하로 나타났다. 가구가 설치되지 않은 101호와 비교하면 벤젠 방출량을 제외하고 톨루엔 13.8배, 폼알데하이드 약 1.8배, 에틸벤젠 4.7배, 자일렌 3.7배, 스틸렌 6.6배 정도 높게 방출되었다. 이는 마감재 시공 및 가구반입 직후 익일 측정하여 가구미설치 세대보다 오염물질 방출량이 높게 나타났으며 특히 톨루엔의 경우가 많이 방출되는 것으로 나타났다. 본 1차 측정은 마감 직후 방출량 파악을 위한 것으로 실제로 입주시점의 공동주택은 최종 마감재 및 가구재 반입 후 1~3개월의 경과시간이 있어 오염물질 방출량이 줄어들 것으로 판단된다.

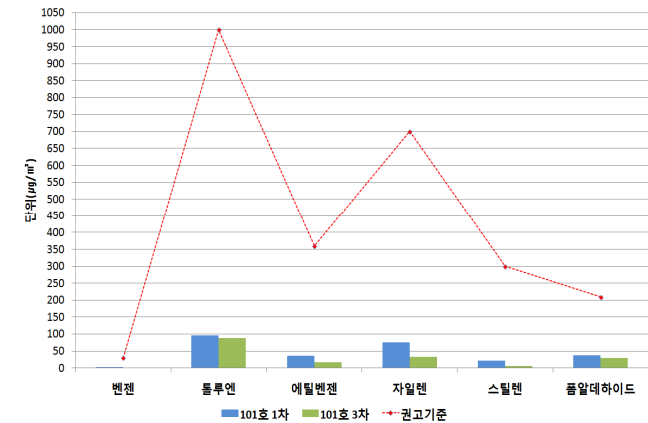


그림 3. 실내공기질 측정결과(101호)

가구재가 설치된 102호의 베이커아웃 실시이후 2차 측정 시는 벤젠 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 톨루엔 815 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 에틸벤젠 291 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 자일렌 323 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 스틸렌 137 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 폼알데하이드 66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 1차 측정 시와 비교하여 보면 많은 방출량을 보였던 톨루엔의 경우 38.4% 줄어들어 권고기준을 훨씬 하회하는 수준으로 떨어졌으며 폼알데하이드는 동일한 방출량으로 나타났으며 다른 오염물질은 다소 증가 하였으나 권고기준 수준을 훨씬 하회하는 수준이었다. 3차 측정 시에는 1차 측정과 비교하여 톨루엔 방출량이 85%가 저감되어 15% 수준으로 나타나 큰 폭으로 저감 되었으며 폼알데하이드 방출량은 54.5% 저감돼 45.5% 수준으로 나타났다.

마감재 반입 직후인 1차 측정 시 가구재를 설치하지 않은 세대(101호)의 경우 측정결과는 그림 3과 같다, 방출량은 벤젠 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 톨루엔 96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 에틸벤젠 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 자일렌 76 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 스틸렌 21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 폼알데하이드 37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 모두 공동주택 권고기준을 한참 하회하는 수준으로 나타났다. 베이커아웃 실시 후 약 2.5개월 후인(77일 경과) 3차 측정 시에는 벤젠 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 톨루엔 88 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 에틸벤젠 16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 자일렌 33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 스틸렌 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 폼알데하이드 29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 1차 측정결과와 비교하여 보면 톨루엔은 약 8% 정도 저감되었으며, 폼알데하이드는 21.6%, 나머지 벤젠, 에틸벤젠, 자일렌, 스틸렌은 각각 약 66.7%, 54.3%, 56.6%, 76.2% 방출량이 저감되었다.

3차 측정결과 붙박이 가구 미설치 세대인 101호와 붙박이 가구 설치세대인 102호를 비교하여 보면 톨루엔 방출량이 102호가 약 2배 수준으로 높았고 스틸렌의 경우 약 6배 정도로 높았으나 권고기준과 비교하여 보면 미미한 수준이었다. 그리고 나머지 오염물질들의 방출량은 유사한 수준으로 나타났다.

마감 및 가구설치 익일에는 가구설치 유무에 따라 세대의 오염물질 방출량 차이가 많이 나타났으나 베이크아웃 실시 이후 2.5개월(77일) 경과 시점에서는 톨루엔을 제외한 방출량이 유사하게 나타났으며 톨루엔의 방출량도 권고기준과 비교하여 미미한 수준으로 저감되었다. 베이크아웃과 환기를 실시하고 일정기간이 경과할 경우 가구에서 방출되는 오염원도 다량 방출, 환기되어 불박이 가구 미설치 세대와 유사하게 나타난 것으로 판단된다. 베이크아웃 시 가구류의 서랍 및 수납 공간을 모두 오픈하여 실시하고 환기를 하여 효과가 있었던 것으로 판단된다.

측정결과 불박이 가구 설치 세대인 102호가 미설치 세대인 101호와 비교하여 오염물질 발생량이 높게 나타나 실내공기 오염물질 주발생원이 실내 가구류인 것을 알 수 있었다. 그러나 베이크아웃 실시 이후에는 오염물질 발생량이 공동주택의 권고기준을 하회하는 것으로 나타났으며 기존문헌 조사를 통한 일반 공동주택의 방출특성과 비교하여 볼 때 유사한 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 모듈러주택 목업 주택을 대상으로 2012년 11월~2013년 2월에 걸쳐 마감재 및 불박이 가구 시공 직후부터 베이크아웃 실시이후, 3차 측정까지 시간경과에 따른 실내공기오염물질 변화추이를 측정하였다. 측정 시 불박이 가구가 설치되지 않은 비교세대를 동시에 측정하여 불박이 가구 설치여부에 따른 오염물질 방출량 차이를 측정 분석하였다.

마감재 및 불박이가구 설치 직후인 익일 측정결과는 설치세대가 미설치 세대와 비교하여 방출량이 높게 나타났으며 톨루엔의 경우는 설치세대에서 권고기준보다 높게 측정되었다.

일반 공동주택에서 실내공기질을 측정하여 주민공고를 하는 입주시점인 베이크아웃 또는 플러시아웃 시행 이후 시점에서의 폼알데하이드 및 휘발성유기 화합물(벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 스틸렌)의 발생량은 두세대 모두 「다중이용시설 등의 실내공기질 관리법」의 공동주택 권고기준을 하회하는 것으로 나타났다. 또한 2차 측정 및 3차 측정을 통하여 오염물질의 발생추이를 측정한 결과, 오염물질의 방출량이 점차적으로 감소하여 약 2.5개월이 경과한 3차 측정 시에는 톨루엔 및 스틸렌을 제외한 오염물질의 농도가 불박이가구

설치세대와 미설치세대가 유사하게 나타났다. 이는 측정 세대 모듈이 7,000mm×2,100mm (14.7m²)의 소형으로 중대규모 주택과 비교하여 베이크아웃 및 환기에 의한 영향이 더 크게 반영될 수 있으므로 불박이 가구에 의해 일시적으로 증가된 오염물질 방출량이 3차 측정 시에는 권고기준을 훨씬 하회하는 수준으로 저감되어 두세대가 유사하게 나타난 것으로 판단된다.

향후에는 모듈조합을 통한 중형 규모이상의 세대를 대상으로 가구설치 유무 및 공간대비 가구의 면적비율 등을 고려하여 오염물질 방출특성에 대한 상관관계 및 일반 공동주택과 비교분석을 통한 모듈러 주택의 특성을 살펴볼 필요성이 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 한국토지주택공사과 포항산업과학연구원의 연구비 지원에 의해 수행된 “강재프레임 주택형 모듈러의 성능 및 시공성 평가” 연구결과의 일부입니다.

참고문헌

1. 국토교통부(2013), 「건강친화형 주택 건설기준」.
2. 김재권 등(2012), “위성도시의 신축공동주택 실내공기질 실측에 관한 연구”, 「대한건축학회 추계학술발표대회 논문집」, 32(2): 305~306.
3. 방중대 등(2014), 「강재프레임 주택형 모듈러의 성능 및 시공성 평가」, 토지주택연구원.
4. 윤재욱(2013), “입주전 신축 공동주택의 휘발성유기화합물 및 폼알데하이드 실측에 관한 연구”, 「대한건축학회 논문집」, 29(7): 265~272.
5. 이상형 등(2011), “신축 공동주택에서 마감재 적용에 따른 실내공기질 개선방안”, 「대한건축학회 논문집」, 27(7): 249~259.
6. 전주영 등(2014), “신축 공동주택의 실내공기질 계절별 실측조사연구”, 「LHI Journal」, 4(4).
7. 함진식(2012), “신축 공동주택의 폼알데하이드 농도 발생특성과 저감대책에 관한 연구”, 「대한건축학회논문집」, 28(9).
8. 환경부(2014), 「다중이용시설등의 실내공기질관리법」.
9. 환경부(2010), 「실내공기질공정시험기준」.
10. 환경부(2010), 「실내공기 오염물질 시료채취 및 평가방법(제 2010-24호 ESO2130)」.
11. 국가법령정보센터, <http://www.law.go.kr/main.html>