

신축 공동주택에서 플러쉬아웃에 따른 폼알데하이드 농도 저감 효과에 관한 연구

Effects of Flush-out in the Reduction of Formaldehyde in Newly Built Residential Buildings

박상인(Sang In Park), 김주한(Joo Han Kim), 박준석(J.S. Park)[†]

한양대학교 대학원 건축공학과

Graduate School of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea

(Received December 30, 2017; revision received January 21, 2018; Accepted: January 22, 2018)

Abstract The purpose of this study was to confirm the effects of flush-out in the reduction of formaldehyde concentration in newly built residential buildings. The field measurements were conducted on two complexes of multi-residential buildings which are located in the suburban area of Seoul. About eight samples of residential buildings were selected to measure the changes in formaldehyde concentrations after flush-out from the two apartment complexes. The concentration of formaldehyde was measured using DNPH cartridge and HPLC. From the results of the field measurements, it was established that indoor formaldehyde concentration decreases 27.6~54.2% in the samples after flush-out. The number of days that the flush-out were conducted was noted to have no significant influence on the reduction rate of formaldehyde concentration when the flush-out continued more than 7 days. The comparison with Bake-out showed that flush-out also can reduce formaldehyde in newly built buildings as same levels of it.

Key words Healthy residential building(건강주택), Newly built(신축), Indoor Air Quality(실내 공기질), Formaldehyde(폼알데하이드), Flush-out(플러쉬아웃)

[†] Corresponding author, E-mail: junpark@hanyang.ac.kr

1. 연구배경 및 목적

실내 공기 중에 존재하는 폼알데하이드나 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs)은 새집증후군의 원인 물질로 주목받고 있으며 이러한 유기화합물질(Organic compounds)에 대한 재실자들의 폭로량을 줄이기 위하여 환경부에서는 2005년 “다중이용시설 등의 실내 공기질 관리법”의 개정을 하였다. 개정된 법에서는 먼저 신축 공동주택에서의 실내 공기질 권고기준을 설정하였고, 오염원의 방출량을 줄이기 위하여 오염물질 다량 방출 자재의 사용제한에 대한 규정이 포함되었다. 또한 실내 오염물질을 신속히 실외로 배출시키기 위한 환기장치의 설치가 의무화 되었다.

신축 공동주택의 실내 공기질과 관련하여 지난 2014년에는 국민의 건강과 쾌적한 주거환경을 조성하기 위하여 “건강친화형 주택건설기준”이 새로이 만들어졌다. 여기서 “건강친화형 주택”이라 함은 오염물질의 방출량이 적은 건축자재를 사용하고 환기 등을 실시하여 일정수준 이상의 실내 공기질과 환기성능을 확보한 주택을 말한다. “건강친화형 주택건설기준”에서는 건축자재 및 환기 뿐만아니라 입주 전 신축 공동주택의 실내 공기질을 향상시키기 위하여 플러쉬아웃(Flush-out)의 시행을 의무화하였다. 플러쉬아웃이란 일정량의 외기를 이용하여 실내에 있던 오염물질을 희석하여 외부로 배출시키는 것을 말하며 기존에 시행되었던 베이카아웃(Bake-out)과 같이 실내를 난방하지는 않는다. 플러쉬아웃의 경우 실내 온도 16℃, 상대습도 60% 이하의 조건을 권장하고 있으며

각 개별 세대별로 대형 팬 또는 기계환기장치를 이용하여 단위면적당 400 m³/m²의 외기를 실내로 강제 공급하도록 규정하고 있다.

신축 공동주택에서 플러쉬아웃과 관련하여 저자들은 이미 2건의 선행연구를 수행하였다. 먼저 플러쉬아웃 시행에 관하여 건설사를 대상으로 설문조사를 실시하여 각 건설사에서는 구체적 매뉴얼이 없이 현장 조건에 따라 임기응변으로 플러쉬아웃을 시행하고 있음을 확인하였고, 시뮬레이션을 이용하여 최소 14일 이상 플러쉬아웃을 시행할 경우 실내 오염물질 농도 감소에 가장 큰 효과가 있는 것을 보고하였다.⁽¹⁾ 두 번째의 선행 연구에서는 플러쉬아웃 시행 시 발생하는 비용을 분석하고자 에너지 시뮬레이션을 실시하였다.⁽²⁾ 에너지 시뮬레이션에서는 플러쉬아웃 기간 중 실내 권장온도를 유지하기 위한 난방비용 및 팬 동력을 포함한 비용을 분석하였다. 분석 결과 세대 당 겨울철 플러쉬아웃 비용은 중부지방은 30,000원 남부 지방은 27,000원을 넘지 않는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 앞서 제시된 선행 연구의 결과들을 실증하고자 폼알데하이드를 대상으로 신축 공동주택에서 현장 실험을 실시하였다. 현장실험에서는 샘플로 선정된 8세대의 신축 공동주택에서 플러쉬아웃 전과 후의 폼알데하이드 농도를 분석하고, 플러쉬아웃 시행 조건에 따른 실내 오염물질 저감 효과를 정량적으로 분석하였다.

2. 실험개요

2.1 측정 대상 신축 공동주택

현장 실험은 1차 측정과 2차 측정으로 나누어 진행하였다. 먼저 1차 측정은 경기도에 위치한 신축 공동주택 단지(A1)를 대상으로 2016년 9월 12일부터 9월 27일까지 실험을 실시하였다. 측정 대상으로는 신축 공동주택 단지에서 저층부에 위치한 국민주택규모(85 m²)의 5개 세대(이하 샘플)를 선정하였으며 각 실험 세대의 개요는 Table 1과 같다. 1차 측정의 보완 및 추가 검증을 위하여 2차 측정을 2017년에 실시하였다. 2차 측정에서는 1차 측정 단지와는 다른 경기도에 위치한 신축 공동주택 단지를 대상으로 하였으며 1차 측정과 유사한 조건을 가진 3세대를 선정하여 실험을 진행하였다. 또한 2차 측정에서는 각 샘플의 기밀성능을 블로어로 측정하였으며 50 Pa에서의 외기 유입량이 2.5~3.7의 분포를 나타내 에너지 절약 건물에 준하는 기밀성능을 가지고 있는 것으로 조사되었다.

2.2 측정 대상 항목 및 방법

Table 2는 측정 대상 및 측정 기기의 개요를 Fig. 1은 측정 대상 샘플 세대의 평면 및 세대 내에서의 측정 위치를 나타낸다. 각 샘플 세대에서는 먼저 블로어 도어(Blower Door Modelr 3)를 이용하여 측정세대의 기밀성능을 측정하였고, 캡처후드(Capture Hood)를 사용하여 기계급기 팬의 취출구와 레인지 후드, 그리고 플러쉬아웃 전용 팬 등에서의 시간당 외기 도입량을 측정하였다. 또한 각 샘플에서 플러쉬아웃 시행 중에는 써멀 레코더(Thermal recorder TR-71/Data recorder MCH-383)를 이용하여 실내외의 온습도를 10분 간격으로 측정하였다.

Table 1 Physical properties of the sample apartments

Sample	Complex	Built year	Floors/Top	Area[m ²]	Volume[m ³]	Airtightness [ACH at 50 Pa]
A	A1	2016	2/23	84.9	195.2	-
B			3/23	84.9	195.2	-
C			2/23	84.9	195.2	-
D			2/23	84.9	195.2	-
E			3/23	84.9	195.2	-
F			4/25	102.3	235.4	3.7
G	A2	2017	11/25	102.3	235.4	3.4
H			5/25	81.0	186.3	2.5

측정 샘플 세대에서 플러쉬아웃 전과 후의 실내 폼알데하이드 농도는 환경부에서 제시한 “실내 공기질 공정 시험 기준”에 따라 측정하였다. 각 샘플 세대는 측정에 앞서 외기에 면한 모두 창문과 문을 30분 이상 개방하여 외기로 충분히 환기한 후에 모든 창문을 닫아 5시간 밀폐를 하였다. 5시간 밀폐 후에는 거실의 중앙 1.2 M 높이에서 DNPH 카트리지를 이용하여 폼알데하이드를 샘플링하였다. 5시간 밀폐 중에는 실간의 이동을 위한 문과 함께 모든 수납가구의 등을 개방하였다. 또한 플러쉬아웃 시행 중 실내 폼알데하이드 농도의 감소를 확인하기 위하여 플러쉬아웃 전과 후뿐 아니라 플러쉬아웃 시행 중에도 폼알데하이드의 농도를 측정하였으며 이때는 공정시험기준에 따르지 않고 외기를 도입하고 있는 조건에 측정을 실시하였다.

2.3 플러쉬아웃 조건

Table 3은 각 샘플 세대에 적용한 플러쉬아웃의 조건을 나타낸다. 샘플 세대 A와 F에서는 비교를 위하여 플러쉬아웃을 실시하지 않았으며 다른 샘플 세대가 플러쉬아웃을 실시하고 있는 동안 외기에 면한 창과 문 등의 모든 개구부를 밀폐하였다. 샘플 세대 B와 G의 경우 각 세대 내에 설치된 기계환기 팬을 이용하여 플러쉬아웃을 실시하였다. 또한 샘플 C세대에서는 기계환기 팬 대신 주방에 위치한 레인지 후드를 이용하여 플러쉬아웃을 실시하였으며 레인지 후드를 이용하여 실내 공기를 배출할 때는 원활히 외기를 도입하고자 외기에 면한 모든 창문을 약 3 cm 정도 개방하였다.

플러쉬아웃의 실시 시간 변화에 따른 실내 농도 저감 효과의 차이를 비교하고자 풍량의 조절이 가능한 플러쉬아웃 전용의 급배기 팬(Prototype)을 제작하였다. 제작된 플러쉬아웃 전용 급배기 팬은 외기에 면한 거실과 주침실의 창문에 각각 1개씩 설치하였고 실내 공기는 현관문에 설치한 배기 팬을 통하여 실외로 배출되었다. 플러쉬아웃 전용 팬이 설치된 샘플 세대 D, E와 F에서는 0.5회/h와 1.0회/h의 환기횟수로 외기를 도입하였으며 각각의 플러쉬아웃 기간은 14일과 7일로 하였다.

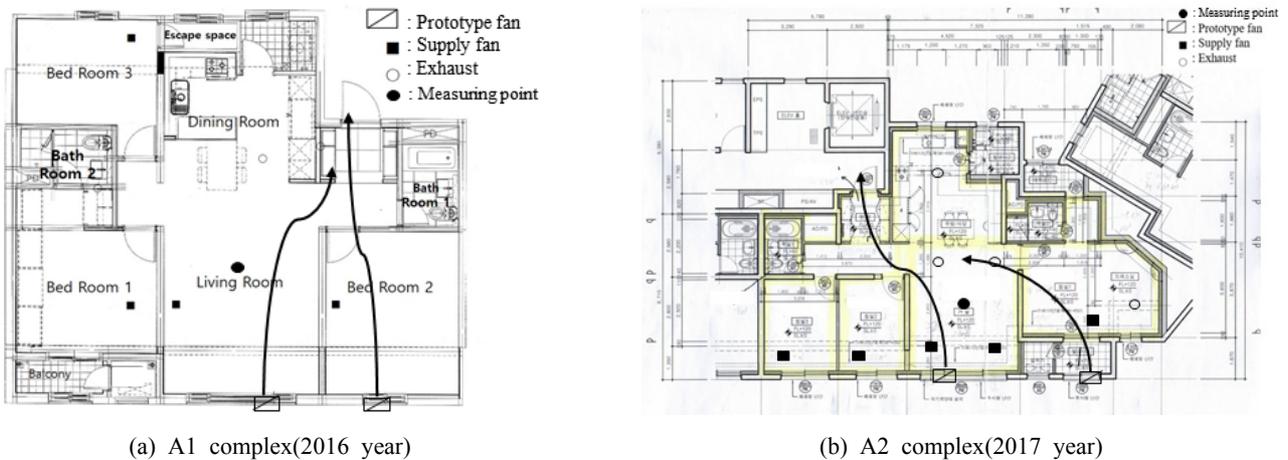


Fig. 1 Floor plan and Flush-out methods.

Table 2 Methods and materials of the field experiments

	Parameters		Device	Interval/Sampling
Outdoor	Temperature	Relative humidity	Thermal recorder TR-71UI	10 min
	Temperature	Relative humidity	Data recorder MCH-383SD	10 min
Indoor	Formaldehyde	SIBATA DNPH Cartridge, HPLC	Mini Pump, Cartridge, HPLC	Three times
Air flow	Flow rate	Capture	Hood G200d	1 time
Airtightness	Air Change per Hour	Model	3 Blower Door	1 time

3. 실험결과

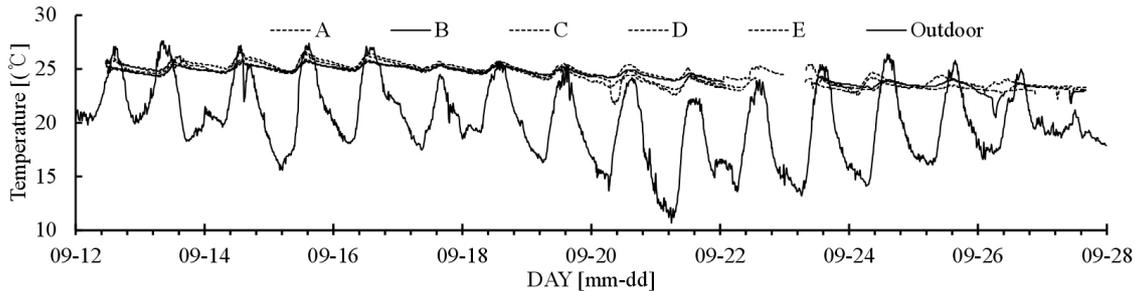
3.1 플러쉬아웃 중 실내외 온열환경

Fig. 2에 실험 기간 중 샘플 세대 실내 온도를 외기 온도와 비교하여 나타낸다. 1차 측정(2016년)의 경우 외기온은 최저 10.7℃에서 최고 27.6℃의 분포를 나타냈으며 측정 기간 중 평균 외기온은 20.1℃로 조사되었다. 샘플 세대 내 실내 온도는 외기온과 비교하여 약 5℃ 높은 24.5℃의 평균 온도를 나타냈으며 일별 온도차이 또한 매우 작은 것으로 조사되었다. 2차 측정의 경우는 1차 측정에 비하여 외기온은 약 4℃, 샘플 세대 내 실내 평균온도는 약 3℃ 낮은 것으로 조사되어 1차 측정 및 2차 측정 모두 “건강친화형 주택건설기준”에 따른 플러쉬아웃 시행 시 권장 실내 온도인 16℃ 이상을 만족함이 확인되었다.

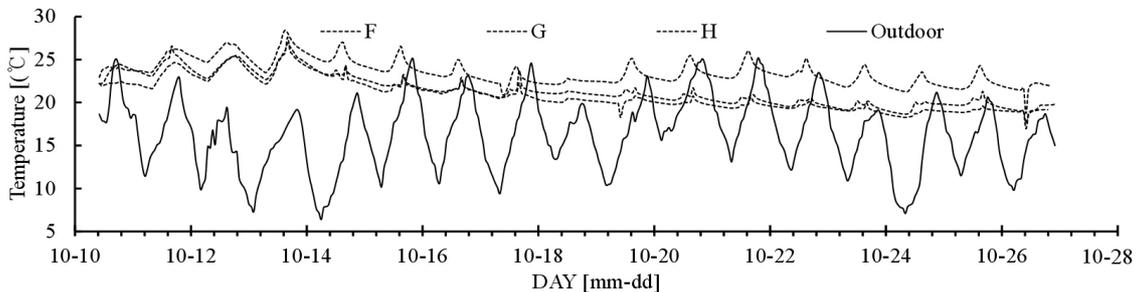
실내 상대습도는 1차 측정 시 최저 38.2% 최고 73.4%로 플러쉬아웃 권장 상대습도인 60%를 초과하는 경우가 있었으나 평균 상대습도는 60.9%로 권장기준을 만족하는 것으로 나타났다. 2차 측정의 경우 최저 28.0% 최고 78.9%로 1차 측정과 동일하게 권장 상대습도인 60%를 초과하는 경우가 있었으나 평균 상대습도는 52.1%로 권장 기준보다 다소 낮은 것으로 조사되었다. 모든 측정 기간 중 실내외 온도와 상대습도를 조절하기 위한 별도의 장치를 샘플 세대 내에 설치하지 않았으나 세대 내의 온도와 상대습도는 “건강친화형 주택건설기준”에서 제시하고 있는 플러쉬아웃의 권장기준을 만족하고 있는 것으로 나타났다.

Table 3 Flush-out methods in the samples

Sample	A	B	C	D	E	F	G	H
Using fan	None	Supply fan	Range hood	Prototype	Prototype	None	Supply fan	Prototype
Air flow rate [m ³ /h]	0.0	136.6	175.6	97.6	195.2	0.0	124	193.7
Air change rate [1/h]	0.0	0.7	0.9	0.5	1.0	0.0	0.5	1.0
Number of days [day]	0.0	10.4	14.5	14.5	7.0	0.0	13.8	7.0
Total outdoor air [m ³]	0.0	33,960	61,094	33,960	33,960	0.0	40,948	32,420
Flush-out volume [m ³ /m ²]	0.0	400	710	400	400	0.0	400	400



(a) A1 complex(2016 year)



(b) A2 complex(2017 year)

Fig. 2 Temperature and relative humidity in indoor and outdoor.

3.2 폼알데하이드 농도

Fig. 3에 “실내 공기질 공정시험 기준”에 따라 플러쉬아웃 시행 전에 측정된 각 샘플 세대들의 폼알데하이드의 농도 분포를 나타낸다. 샘플 세대 C를 제외하고 모두 $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하의 농도를 나타냈으며 평균 농도는 신축 공동주택의 권장기준인 $210 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 훨씬 낮은 $56.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 조사되었다. C세대의 경우 $173 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 권고기준을 초과하는 수준은 아니었으나 동일단지의 다른 세대에 비하여 높은 농도를 나타냈다. 이렇게 C세대에서 폼알데하이드의 농도가 높게 나온 것은 측정 바로 전에 발코니에서 시행된 내부 마감공사가 그 원인으로 추정되었다.

3.3 플러쉬아웃에 따른 폼알데하이드 농도 저감 효과

플러쉬아웃 시행에 따른 실내 폼알데하이드 농도의 개선 효과는 플러쉬아웃 시행 전과 후에 “실내 공기질 공정시험 기준”에 따라 측정된 실내농도의 저감율(Reduction rate)로 분석하였으며 저감율은 다음과 같은 식으로 정의 하였다.

$$\Delta Reduction\ rate = \frac{(C_f - C_i)}{C_i} [-] \tag{1}$$

여기서, C_i 는 플러쉬아웃을 시행하기 전의 실내 폼알데하이드의 농도 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]를, C_f 는 플러쉬아웃 시행 후의 농도 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]를 나타낸다. Fig. 4는 각 샘플 세대별 폼알데하이드 저감율을 나타낸다. 플러쉬아웃을 시행하지 않은 A와 F세대의 경우 농도가 다소 증가하는 경향을 나타냈으며 이는 다른 샘플 세대들이 플러쉬아웃을 시행하고 있을 때 실내를 밀폐함으로 인하여 발생 오염물질이 원활히 실외로 배출되지 못 하였고 일부는 표면에 흡착되었기 때문으로 판단된다. 그 외 플러쉬아웃을 시행한 모든 샘플 세대에서는 폼알데하이드 농도가 감소하였으며 특히 농도가 가장 높았던 C세대의 경우 초기 농도 대비 약 70%까지 감소하였다. 이와 같이 C세대에서 높은 감소율이 나타난 것은 앞서 언급한 것과 같이 초기 농도의 측정 시 마감공사로 인한 영향으로 판단된다. 마감공사의 영향을 받은 C세대를 제외할 경우 플러쉬아웃을 시행한 후 시행 전 대비 27.6~54.2% 정도 폼알데하이드 농도가 저감되는 것으로 조사되었다.

“건강친화형 주택건설기준”에서는 개별 세대별로 단위면적당 400 m^3 의 외기를 공급하도록만 규정되어 있으며 공급외기의 시간당 풍량 및 시행 기간에 대해서는 별도의 기준을 제시하고 있지 않다. 대부분의 건강친화형 공동주택의 경우 0.5회/h의 환기기준을 만족하는 환기장치가 설치되어 있어 이러한 환기 장치를 플러쉬아웃에 이용할 경우 Table 2에 제시한 것과 같이 약 14일간 환기설비를 가동하여야 하며 플러쉬아웃을 위한 별도의 기계장치를 설치하여 외기도입량을 1.0회/h로 공급한다면 플러쉬아웃의 시행기간을 7일로 단축할 수 있다.

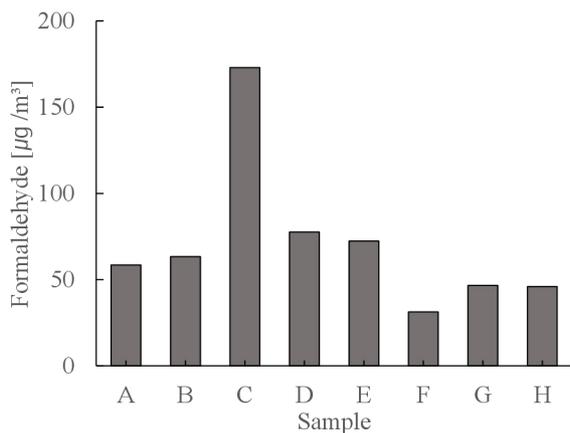


Fig. 3 Formaldehyde concentration in the samples before the flush-out.

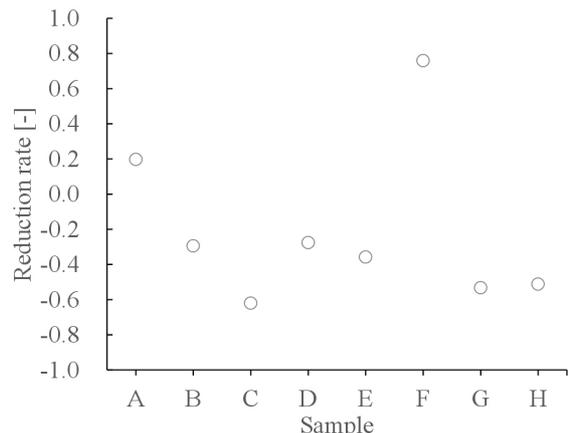


Fig. 4 Reduction rate of formaldehyde after flushing out in the samples.

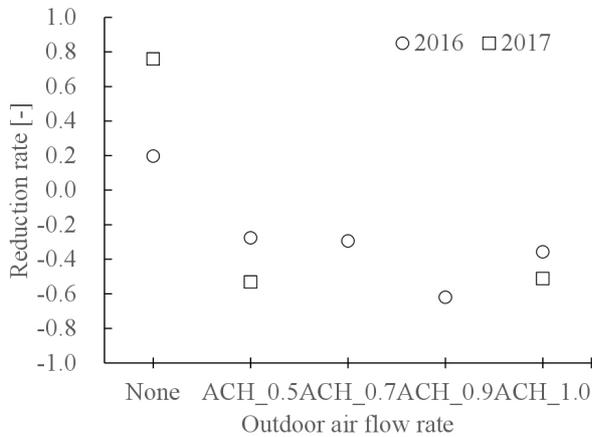


Fig. 5 Changes of reduction rate according to the number of days for flushing.

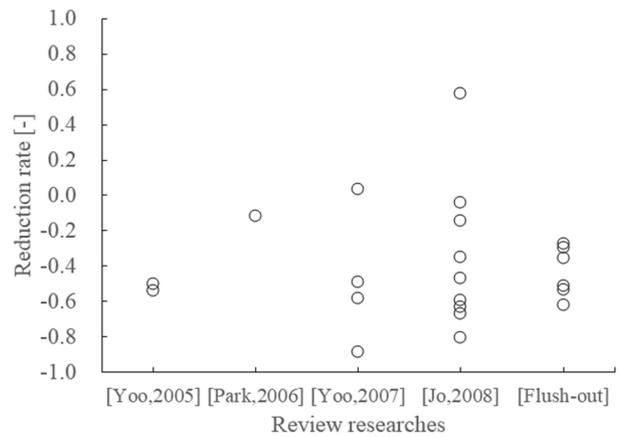


Fig. 6 Comparing the formaldehyde reduction rate of flushing-out with the Bake-out.

Fig. 5는 플러쉬아웃의 시행기간에 따른 실내 폼알데하이드 농도의 저감효과를 비교하여 나타낸다. 1차와 2차 측정 모두 플러쉬아웃 시행 기간 또는 시간당 외기도입 풍량에 따른 저감효과의 차이는 크지 않은 것으로 조사되었다.

또한 기존 베이킹아웃과 플러쉬아웃의 폼알데하이드 농도저감 효과를 비교하고자 문헌 조사를 실시하였으며 4편의 베이킹아웃에 관한 실험결과를 얻을 수 있었다. Yoo et al.^(3,4)은 35℃로 세대 내에서 난방을 실시하여 6일과 14일간 베이킹아웃을 실시하였고, Park et al.⁽⁵⁾은 Yoo와 유사한 35℃로 Jo et al.⁽⁶⁾은 이 보다 낮은 30℃로 각각 베이킹아웃을 실시하였다. Fig. 6는 베이킹아웃에 관한 기존연구 결과와 본 연구의 결과를 비교하여 나타낸다. 기존 연구결과와의 비교를 통하여 플러쉬아웃 또한 베이킹아웃과 유사한 정도의 실내 폼알데하이드 농도 저감효과가 있음이 확인되었다. 기존의 베이킹아웃 측정결과 일부에서 폼알데하이드 농도가 초기보다 더 증가한 경우가 있으나 이는 베이킹아웃 중 오염물질 배출에 충분한 환기가 이루어지지 않았기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 2개 단지에서 샘플로 선정된 8세대의 신축 공동주택을 대상으로 플러쉬아웃 전과 후의 폼알데하이드 농도를 분석하고, 플러쉬아웃 시행 조건에 따른 실내 오염물질 저감 효과를 정량적으로 분석하였다. 플러쉬아웃 시행 후에는 실내 폼알데하이드 농도가 27.6~54.2% 정도 감소하는 것으로 조사되었으며 7일 이상 플러쉬아웃이 시행될 경우 시행 기간 또는 시간당 외기도입 풍량에 따른 실내 폼알데하이드 농도의 저감효과에는 큰 차이가 없는 것으로 조사되었다. 또한 기존 연구결과와의 비교를 통하여 플러쉬아웃이 기존에 시행되었던 베이킹아웃과 유사한 정도의 폼알데하이드 농도 저감효과가 있음을 확인하였으며 추후 폼알데하이드 뿐만 아니라 휘발성유기화합물질에 대한 오염저감 효과 및 효과적 오염물질 저감을 위한 플러쉬아웃 프로세스에 관한 후속 연구가 필요할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2017년도 국토교통과학기술진흥원 연구비 지원에 의한 결과의 일부임(과제번호 : 17RERP-B082754-04-000000).

References

1. Kim, K. H., Lee, K. Y., and Park, J. S., 2015, A study on the current status and improvement in performing flush-out in muti-family residential buildings, Korean Journal of The Architectural Institute, Vol. 31, pp. 129-134.
2. Lee, K. Y., Kim, K. H., and Park, J. S., 2016, Study of energy cost for performing flush-out in newly constructed

- multi-residential buildings during winter season, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 28, pp. 110-114.
3. Yoo, B. H., Park, Y. S., and Cho, H., 2005, Reduction Effect on Chemical Substance in Indoor Air Pollution Using Bake-out, Proceedings of the AIK 2005 Annual Conference, Vol. 25, No. 1, pp. 83-86.
 4. Park, E. Y., Kang, D. H., Choi, D. H., Sung, M. K., Yeo, M. S., and Kim, K. W., 2006, An Experimental Study on Bake-Out of New Apartment Buildings in Summer, Proceeding of the SAREK 2006 Winter Annual Conference, pp. 138-143.
 5. Yoo, B. H., 2007, A Study on Reduction Effect of Chemical Substances on Different Methods of Bake Out in New Apartment in Summer, Korean Journal of The Architectural Institute, Vol. 23, No. 9, pp. 163-171.
 6. Jo, W. J. and Sohn, J. Y., 2008, The Effect of Bake-out Conditions on Indoor Air Quality, Korean Journal of The Architectural Institute, Vol. 24, No. 9, pp. 295-302.