플러쉬아웃 공기 온도에 따른 신축공동주택의 실내 오염물질 저감효과에 관한 연구

이승림^{1†} · 조성원¹ · 유지현² · 조가영²

¹(주)네드, 대리

²서울기술연구원 스마트도시연구실, 연구원

Effects of Flush-out Air Temperature on Reducing Indoor Air Pollutants in Newly Built Residential Buildings

Lee Seung-Rim^{1†} · Cho Sugwon¹ · Yoo Jihyun² · Cho Ga Young²

¹Assistant Manager, NED

²Researcher, Department of the Smart City Research, Seoul Institute of Technology Research

[†]Corresponding author: lsr930422@gmail.com

Abstract

In this study, the effect of flush-out temperature on indoor pollutant reduction was studied in a thermal environment chamber, whose design resembles that of a residential building. The results of this study and those of previous studies were compared. The measurement was carried out at 11°C and 16°C following a 6-day flush-out at. Consequently, the pollutants decreased by compared to 56% ~ 78% in previous studies. The flush-out had a reduction effect on the pollutants even at low temperatures. When compared with field measurement results, the effect of the pollutants reduced by flush-out temperature was different; however, it was confirmed that the flush-out has some effect of reducing pollutants even at low temperatures. By comparing the current results with those of field and chamber experiments conducted in previous studies with a t-test, the p-value was 0.05 or higher, indicating that the number of temperature-induced ventilations in the entire dataset was not a significant factor in the pollutant reduction effect. Therefore, based on the t-test analysis results of pollutant reduction effect by temperature, it was confirmed that the higher the temperature, the greater the pollutant reduction effect, 13% to 80%. The difference in the reduction effect by temperature varied for each pollutant.

Keywords: 신축공동주택(Newly Built Residential Buildings), 새집증후군(Sick Building Syndrom), 플러쉬아웃(Flush-out), 포알데하이드(Formaldehyde), 휘발성유기화합물(VOCs)

1. 연구의 배경 및 목적

최근 국내 건축물들은 건설 기술의 발달과 건축물의 에너지 성능 향상을 위해 기밀성과 단열성을 고도화시켜 에너지 절약형 건축물을 목표로 시공하였다. 이에 따라 충분한 환기 성능을 확보하지 못하는 신축 공동주택이 늘어남에 따라 실내에서 발생하는 오염물질이

Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.42, No.1, pp.77-85, February 2022
<https://doi.org/10.7836/kjes.2022.42.1.077>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 30 October 2021

Revised: 9 November 2021

Accepted: 1 December 2021

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

증가하여 실내 거주자들에게 호흡기 질환 및 면역력 약화 등의 문제를 유발하는 것으로 알려졌다¹⁾. 또한 마감 공사 및 각종 실내 마감재와 붙박이장에서 방출되는 휘발성 유기화합물(VOCs)과 폼알데하이드(Formaldehyde)가 거주자와 입주자들의 실내공기질에 주된 오염원과 새집증후군의 원인 물질로²⁾ 알려지면서 이에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다³⁾. 국내에서는 거주자와 입주자들의 실내공기질 피해 예방과 쾌적한 실내공기질을 조성 및 제공하기 위해 2014년도부터 ‘건강 친화형 주택건설 기준’을 시행하고 있다. ‘건강 친화형 주택 건설 기준’에서는 일정 기준 규모 이상의 신축 공동주택 단지에서는 플러쉬아웃(Flush-out) 혹은 베이크아웃(Bake-out)을 실시하도록 명시하고 있다. 이때 플러쉬아웃이란 마감 공사가 완료된 신축 공동주택에 단위 면적당 400 m³ 이상의 외기를 Fan 또는 환기장치를 통하여 실내에 공급하여 마감 공사 후 오염된 실내공기를 실외로 배출하는 행위를 말한다. 그러나 플러쉬아웃을 시행 기준에서는 풍량과 온도, 습도, 조건 등의 간략한 내용만이 제시되어 있을 뿐 구체적인 실시 방법이나 기간에 대한 방법론이 부족한 실정이다⁴⁾. 앞선 선행연구에서는 플러쉬아웃 행위를 시뮬레이션 및 현장실험을 통하여 플러쉬아웃의 오염물질 저감효과를 평가하고⁵⁾ 기존 Fan을 제외한 주택 내 환기장치를 이용하여 플러쉬아웃을 하는 방법을 검증하고 플러쉬아웃과 베이크아웃의 오염물질 저감 효과를 비교하였다⁶⁾. 그러나 플러쉬아웃의 효과를 정확하게 검증하기 위해서는 환경적 요인들이 중요한 요소라고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 챔버실험을 통하여 플러쉬아웃 시행 기준 이하의 온도에서 오염물질 저감효과를 확인하기 위해 챔버실험을 진행하고 현장실험과 챔버실험 결과를 바탕으로 플러쉬아웃 시행온도가 오염물질 저감효과에 주는 영향을 분석하였다.

2. 플러쉬아웃(Flush-out) 실험

2.1 챔버 실험

Fig. 1에서는 챔버실험을 위해 주거 환경을 모사한 모습을 나타냈으며, 측정기간 그리고 대상에 관한 정보는 Table 1에 표시하였으며 Table 2에는 챔버 실험 시 사용된 장비에 대한 정보를 나타냈다. 챔버 실험은 2019년 11월 ~ 2019년 12월까지 온습도 조절이 가능한 대형 챔버에서 진행하였다. 챔버 실험 기간내에 실내 및 실외의 온습도를 측정하기 위해 데이터 로거(UX100-023)를 통하여 10분 간격으로 측정하였으며 오염물질 측정은 플러쉬아웃 전, 중, 후 3번을 실내공기질 공정시험법에 의거하여 1.5 m높이에서 오염물질 시료 채취용 펌프(SIBATA mini pump Σ -100)에 Tenax TA 200 mg와 DNPH 카트리지를 결합하여 30분간 연속 2회 측정을 실시하였다. 또한 2회 측정 평균값을 오염물질 농도로 사용하였다.

챔버실험은 챔버 내에 주거환경을 모사하기 위해 주방과 거실을 대상으로 수납장과 주방수납장을 선정하여 배치하였으며, 이는 모두 친환경 자재 최우수등급 인증 가구와 자제들을 배치하여 주거환경을 모사하였다. 챔버 내의 침기량은 CO₂ 추적가스법(Tracer Gas Method)으로 확인하였으며, 총 2회 측정한 값을 챔버의 침기량을 확인하였다.

Table 1 Physical properties of the Chamber experiment samples and Flush-out condition

Sample	Area [m ²]	Volume [m ³]	Airtightness	Air flow late [m ³ /h]	Air change rate [1/h]	Number of days [day]	Temperature [°C]
Chamber 11°C	15	34.12	0.06	40	1.1	6	11.1
Chamber 16°C	15	34.12	0.06	40	1.1	6	16.8

Table 2 Measurement parameter and the specification of devices

Parameter	Device	Accuracy	Interval [min]
Outdoor	Dry-bulb Temperature	±0.05°C	10
	Relative humidity	±2.5%RH	10
Indoor	Dry-bulb Temperature	±0.05°C	10
	Relative humidity	±2.5%RH	10
	Airtightness	Model 3 Blower Door	-
	Air flow late	Capture Hood G200d	±3%
	VOCs	SIBATA mini pump Σ -100)	-
Pollutant	Formaldehyde	SIBATA mini pump Σ -100)	-

Fig. 1 Chamber experiment status

2.2 현장실험

Table 3에는 현장실험의 개요를 나타냈다. 현장실험은 2016년 09월 ~ 2020년 09월까지 총 4개 단지를 대상으로 15세대의 신축 공동주택에서 플러쉬아웃을 시행하였다. 현장실험은 외기도입 및 배출을 위해 FAN을 외

기에 면한 창문 부위에 설치하거나 신축 공동주택에 설치된 레인지 후드와 화장실 배기 팬을 이용하여 외기도 입 및 실내공기 배출을 유도하였다. Table 2에서는 실험 시 사용된 장비를 나타내고 있다. 오염물질 채취는 플러쉬아웃의 시작 전, 중, 후로 각 실험당 3회 측정을 진행하였으며 실내공기질 공정 시험법 절차에 따라 1.5 m 높이에서 2회 측정하였다.

Table 3 Physical properties of the Field experiment samples and Flush-out condition

Sample	Area [m ²]	Volume [m ³]	Airtightness [ACH at 50PA]	Air flow rate [m ³ /h]	Air change rate [1/h]	Number of days [day]	Location
2016	A1	84.9	203.7	-	105.2	0.5	Gyeonggi-do
	A2	84.9	203.7	-	195.1	0.9	
	A3	84.9	203.7	-	145.3	0.7	
	A4	84.9	203.7	-	203.8	1.0	
2017	B1	102.3	235.4	3.4	124.0	0.5	Gyeonggi-do
	B2	102.3	186.3	2.5	193.7	1.0	
2018	C1	92.5	212.8	2.9	150.0	0.7	Busan
	C2	92.5	212.8	2.7	200.0	0.9	
	C3	72.5	166.8	-	255.0	1.2	
	C4	72.5	166.8	-	255.0	1.2	
	C5	72.5	166.8	-	320.0	1.5	
	C6	92.5	212.8	-	425.5	2.0	
2020	D1	36	88.8	1.9	33.35	1.0	Gyeonggi-do
	D2	36	88.8	2.3	33.35	1.0	
	D3	36	88.8	2.1	33.35	1.0	

3. 플러쉬아웃 시행온도에 따른 오염물질 저감효과

3.1 상관관계 분석

실험데이터는 각각이 다른 조건으로 플러쉬아웃 실험을 진행하여 시행 온도를 기준으로 오염물질 저감효과를 비교하기 위해서는 조건 중 풍량과 시행 기간을 결정하는 환기횟수와 저감효과 간의 상관관계를 확인하고 비교를 진행해야 함으로 데이터 전 처리 과정이 필요하였다. 1.0회/h의 환기횟수를 기준으로 저감률 데이터를 분류하였으며 T-test 분석 결과를 Fig. 2에 나타내었다. T-test 분석 결과, P-value > 0.05로 환기횟수에 따라 저감효과는 유의미한 차이가 없는 것으로 나타났으며 환기횟수를 고려하지 않고 시행온도만을 통하여 저감효과를 비교하였다

Fig. 2 Relationship to between air change rate and pollutant reducing effect by T-test analysis

3.2 챔버실험 환경 조건

실험환경을 확인하기 위하여 챔버 내 Co2 추적가스법(Tracer Gas Method)을 실행하여 대형챔버의 침기량을 확인하였다. Co2 추적가스법 결과 0.068회/h, 0.069회/h로 챔버의 기밀성능은 0.069회/h로 분석되어 침기량이 플러쉬아웃의 외기도입을 위한 풍량 조절에 미치는 영향이 적은 것으로 나타났다. Fig. 3은 실험 기간 동안의 챔버 내 온도 변화를 나타낸다. 챔버실험은 AHU를 통해 11℃와 16℃로 실내 온도를 유지하면서 실험을 진행하였으며 온도측정 결과는 범위로는 9.6 ~ 12.5℃, 15.9 ~ 17.3℃, 평균온도는 11.01℃, 16.85℃로 나타났으며 챔버 실험의 온도범위는 설정온도에서 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 이내의 범위이며 플러쉬아웃 시행 중의 평균온도는 설정온도와 적은 편차를 유지한 것으로 확인되었다.

Fig. 3 Temperature measured during the experiment

3.3 챔버 실험 오염물질 저감 효과

플러쉬아웃 시행의 기준 온도 16°C 이하에서 플러쉬아웃을 시행하였을 때 오염물질 저감효과를 비교하기 위하여 2017 ~ 2018년도에 진행된 현장실험⁵⁾ 중 2세대를 선정하여 비교하였다. 이를 아래 Table 4에 나타냈으며 Fig. 4에서는 초기 오염물질 농도와 플러쉬아웃 시행 후의 오염물질 농도를 Fig. 5에서는 플러쉬아웃 시행 후 전체 오염물질 저감 효과를 나타냈다. 챔버 내 TVOC 농도는 796 ~ 1036 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 측정되었으며 현장실험은 502 ~ 999 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. Toluene은 챔버 실험에서 191 ~ 303 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 현장실험은 158 ~ 352 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 측정되었다. 개별 오염물질의 농도 차이는 존재하지만 두 실험 간의 오염물질 농도 차이가 16 ~ 30% 정도로 나타나 챔버 내 주거환경이 구현됨을 확인하였다. 11°C로 플러쉬아웃을 시행하였을 때 오염물질의 농도가 12 ~ 69%, 16°C에서는 12 ~ 64% 나타났다. 개별 오염물질 저감효과는 TVOC는 각각 50%, 36%, Formaldehyde는 31%, 13%, Toluene은 43%, 22%, Styrene은 20%, 64%, Xylene은 59%, 26%, Benzen은 17%, 30%, Ethylbenzen은 69%, 11%의 저감 효과를 나타냈다. 시행온도별 오염물질 저감효과는 11°C에서는 31 ~ 50%, 16°C에서는 13 ~ 36%, 21°C에서는 56 ~ 78%, 31°C에서는 44 ~ 65%로 나타났으며, 실시 온도에 따라 오염물질 저감효과는 약 13 ~ 57%의 차이를 보였다.

Table 4 Physical properties of the samples and Flush-out condition

Sample	area [m ²]	Volume [m ³]	Airtightness	Air flow rate[m ³ /h]	Air change rate [1/h]	Number of days [day]	Temperature [°C]
Chamber (11°C)	15	34.125	0.06	40	1.1	6	11.01
Chamber (16°C)	16.85	34.12	0.06	40	1.1	6	16.8
Field (21°C)	81	193	2.5	193.7	1.0	7	20.97
Field (31°C)	72.5	174	-	255	1.2	5.5	31.23

Fig. 4 Pollutants concentration before and after by Flush-out

Fig. 5 Comparison of pollutant reduction effects by Flush-out

3.4 플러쉬아웃 시행 온도에 따른 오염물질 저감효과

Figs. 6 ~ 7에서는 세대별 플러쉬아웃 시행 시 평균 온도 및 편차와 플러쉬아웃 실시 온도별 오염물질 저감률을 나타냈다. 온도에 따른 오염물질 저감효과는 TVOC에서는 23 ~ 76%의 저감효과를 보였으며 Toluene 19 ~ 78%, Formaldehyde 13 ~ 68%, Benzene 6 ~ 90%, Ethylbenzene 11 ~ 89%, Xylene 26 ~ 85%, Styrene에서는 20 ~ 74%의 저감효과가 나타났다. 또한, 온도가 높은 세대에서 측정된 오염물질의 저감효과가 높게 나타나는 경향이 나타났다. 이는 온도의 상승에 세대 내 실내 자재들의 오염물질 방출량이 높아져 저감효과도 높아지는 것으로 판단되며 온도가 오염물질 저감효과에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 하지만 오염물질 별로 저감효과의 차이는 존재하였으며, 특히 오염물질 중 Formaldehyde와 Benzene, Ethylbenzene은 실시 온도상승에 따른 오염물질 저감효과 상승 폭이 높게 나타났으며 Toluene, styrene은 낮은 상승 폭을 보였는데 이는 개별 오염물질 별 방출 특성에 따라서 차이를 보이는 것으로 판단된다.

Fig. 6 Comparison of pollutant reduction effects through washing

Fig. 7 Pollutant reduction effects by Flush-out temperature

4. 결론

본 연구에서는 총 17세대를 대상으로 플러쉬아웃 실시 온도와 오염물질 저감효과의 상관관계를 분석하여 아래와 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 챔버실험과 현장실험의 플러쉬아웃 시행 전 오염물질 농도를 비교하였을 때, 챔버 내에 주거환경을 모사하였다고 볼 수 있다.
- (2) 챔버 내 신축공동주택의 주거환경을 모사하였으며, 권장시행 기준 온도 16°C 이하에서 플러쉬아웃을 실시한 결과, TVOC와 Formaldehyde는 31 ~ 50%의 저감효과를 나타내었고 실제 현장실험과 비교하였을 때, 저감효과의 차이가 권장시행 기준 온도 이하의 온도에서도 플러쉬아웃의 효과가 있음을 확인하였다.
- (3) 시행온도에 따라 저감효과는 오염물질마다 차이를 보였지만 시행온도가 상승함에 따라 저감효과가 높아지는 것으로 나타났다. 하지만 오염물질 별로 온도상승에 따른 저감효과가 차이가 나타나 물질 별 특성에

따른 현상이라고 판단되며, 특히 Formaldehyde같이 온도 의존성이 높은 오염물질은 저감효과가 더 높게 나타났다. 하지만 온도에 따른 저감효과 차이의 추세를 확인 할 수 있었으나, 정량적인 차이를 표현하기에는 어려운 것으로 판단되며 추가적인 실험으로 데이터를 보완한다면 정량적 분석이 가능 할 것이다.

(4) 추후 연구에서는 플러쉬아웃 시행온도의 추가적인 실험과 상대습도, 외부의 풍속 등의 환경요소를 고려하여 분석한다면 더 효과적이고 정량적인 기준과 방법으로 플러쉬아웃을 시행 할 수 있을 것이다.

후기

본 연구는 2020년도 국토교통부 주거환경연구사업의 연구비 지원으로 수행되었음(과제번호 : 20RERP-B082204-07).

본 연구는 2021년도 서울기술연구원의 연구비 지원을 받아 수행되었음(과제번호:2021-AD-007).

REFERENCES

1. Fang, L., Clausen, G., and Fanger, P. O., Impact of Temperature and Humidity on Chemical and Sensory Emissions from Building Materials, Indoor Air, Vol. 9, pp. 193-201, 1999.
2. Ando, M., Indoor Air and Human Health-sick House Syndrome and Multiple Chemical Sensitivity, Kokuritsu Iyakuin Shokuhin Eisei Kenkyujo Hokoku=Bulletin of National Institute of Health Sciences, Vol. 120, pp. 6-38, 2020.
3. Jung, S. Y., Yoon, C. H., and Park, J. S., Long Term Variations of Formaldehyde and VOCs Concentrations in an Apartment Finished by HB Mark Labelling Building Materials, Journal of Architectural Institute of Korea, Vol. 23, No. 7, pp. 277-287, 2007.
4. Yoo, B. H., The Analysis of the Impact on VOC and Formaldehyde Concentration in New Apartment Housing Relation with Air Temperature and Relative Humidity, Vol. 26, No. 5, pp. 383-391, 2010.
5. Lee, K. Y., Optimizing Flush-out Process for Removing Indoor Pollutants in Residential Buildings, Master thesis, Hanyang University, 2016.
6. Park, S. I., Removal of Indoor Air Pollutants in Newly Built Residential Buildings using by Flush-out Method, Master thesis, Hanyang University, 2019.