

신축아파트 환기방식에 따른 실내공기질 변화와 이에 대한 시뮬레이션 및 건강 위해성 평가

Simulation and Health Risk Evaluation of Indoor Air Quality Changes by Ventilation System in New Apartment

포 위*
Baο, Wei

정 재 연**
Jung, Jaeyoun

정 인 수***
Jeong, Insoo

Abstract

In this study, air quality conditions were identified and analyzed in real time, at the same time, living habits and ventilation methods were maintained in the daily life of residents, and thus, this present study focuses on the lifestyles of residents. Previous studies showed a difference from this study, focusing on the study on the effects of changes in indoor air quality on human health according to the indoor air quality process test standards of the Ministry of Environment. Formaldehyde concentrations exceeded all ventilation standards, but satisfied the organic standards of the Ministry of Environment when ventilation devices and air purifiers were activated. As such, it was investigated that a large amount of formaldehyde emission in the condo is initially ventilated, but a certain concentration is maintained. The change in PM2.5 concentration according to the ventilation method showed a clear difference. As a result of simulating indoor air flow during natural ventilation, the effects of wind speed and wind direction affect the flow rate of indoor air, and indoor polluted air is stagnant even in the presence of wind and is not completely discharged. When the risk assessment results are averaged on the day of measurement, the trends of change between adults and children are almost equivalent, but the results address that children are more sensitive to risk than adults.

주요어 : 실내공기질, 포름알데히드, CFD, 위해성 평가

Keywords : Indoor air quality, Formaldehyde, CFD, Risk assessment

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

오늘날 우리 사회는 산업기술의 발달 및 인구의 증가, 경제 활동 수준이 향상됨에 따라 다양하고 복잡한 환경 문제가 발생하고 있다. 현대인들은 보통 하루 24시간 일상생활의 80% 이상을 직장, 가정 등과 같은 실내 공간에서 생활하고 있으며, 실내 환경이 건강에 미치는 영향은 매우 크다고 할 수 있다. 또한 각종 연구에서 보여주듯이 오염물질의 농도가 실외보다 실내가 높다는 결과를 보면 실내환경이 거주자들의 건강에 나쁜 영향을 미치고 있음에 틀림없다¹⁾. 따라서 환경보건학적 측면에서 실내공기질에 대한 대책 마련 및 개선활동 수립은 매우 중요하다 할 수 있다. 건축공사에서 많은 종류의 건축재료가 사용되고 있으며, 화학기술의 발달과 더불어 복합화합물로 구성된 건축재료의 사용량이 증가되고 있다. 이로 인해 휘발성유기화합물 및 포름알데히드 등 유해화학물질들이 공동주택 실내공기 오염

의 주요 원인으로 대두되었다²⁾.

또한 사회적으로 문제가 되고 있는 미세먼지는 실내공기 오염원으로서 건강에 나쁜 영향을 미친다. 특히 입자의 크기가 작을수록 위해성이 크다는 사실이 밝혀졌으며, 법령에서는 크기별로 PM10과 PM2.5로 나누어 표기되고 있다³⁾. PM2.5는 PM10에 비하여 입자가 작아 호흡할 때 폐 속 깊숙이 유입되어 건강에 심각한 영향을 미칠 수 있으며, 장시간 미세먼지를 흡입할 경우 면역력이 급격히 저하되어 호흡기는 물론 피부나 안구, 심혈관 등에 심각한 문제를 일으킨다. 흔히 공동주택의 실내 환경오염물질을 줄이는 데 공기청정기를 생각하는 경우가 많다. 물론 공기청정기는 미세먼지 등 입자성 오염물질 제거에 탁월한 성능을 발휘하지만 라돈과 일산화탄소, 이산화탄소 등 가스성 오염물질을 제거하는 데는 한계가 있다. 결국 실내 공기오염에 대한 가장 효율적인 방법은 자연 환기가 최선의 선택일 것이다. 그러나 겨울철 실내 온도 저하 및 미세먼지 유입 등이 단점으로 지적된다.

실내공기오염으로 인한 건강에 미치는 영향은 실내 체류하는 계층에 따라 다양하게 나타나는데 그중 노인, 영.유아, 어린이, 환자, 임산부 등과 같이 환경 보건학적으로 약자인 민감 집

* 전북대학교 주거환경학과 박사과정

** 전북대학교 주거환경학과 박사과정

*** 전북대학교 주거환경학과 교수, ph.D

(Corresponding Author : Department of Housing Environmental Design, Jeonbuk National University, jeonis @jbnu.ac.kr)

1) Lee, S. C., and M. Chang. Indoor and outdoor air quality investigation at schools in Hong Kong, Chemosphere, 41(1-2), 2000, pp.109-113.

2) 박진철, 신축공동주택에서의 포름알데히드 및 휘발성 유기화합물 측정연구, 중앙대학교 대학원 석사학위논문, 2004, pp.21-37.

3) 환경정책기본법과 수도권 대기환경 개선특별법.

단은 일반 성인에 비해 더욱 영향이 크게 나타난다. 이러한 민감 집단이 주로 이용하는 시설을 대상으로 한 실내공기오염물질의 분포를 조사하는 연구가 다수 수행 되어졌으나 건강영향에 미치는 가능성에 대한 연구 또한 아직은 미비한 실정이다⁴⁾.

본 연구는 신축아파트의 실내에서 다량으로 방출되는 포름알데히드 및 휘발성유기화합물의 제거 방법으로 환기가 가장 쉽고 좋은 방법이라 생각하고 기계시스템 및 자연환기의 다양한 조건으로 환기 평가를 하여 최적화된 환기조건을 제공하고 자 실시하였다. 또한 CFD프로그램을 적용시켜 건물 구조에 따른 높이별, 풍속별 실내공기 배출상태를 추적하였으며, 다양한 환기방법을 실시하여 다량으로 축적되는 오염물질을 찾아내어 건강위해성 평가를 하고자 실시하였다.

1.2 선행연구 고찰

새집증후군의 주요 원인 물질은 건축자재나 가구 등에서 배출되는 포름알데히드(HCHO)와 휘발성유기화합물(VOCs)이다. 이들은 눈, 코, 목의 점막을 자극하여 현기증과 구토, 두통을 유발하고, 심한 경우 아토피성 피부염이나 천식 등을 발생시킨다. 흥미로운 점은 신축 아파트의 실내공기는 입주 전보다 입주 직후에 오히려 더 악화된다는 점이다. 국립환경과학원에서 진행한 연구에 따르면 포름알데히드와 휘발성유기화합물들은 신축 아파트에 입주한 후 농도가 더 높아져 입주 2개월 후 정점에 도달하였으며, 이후 실내 오염물질들은 차츰 감소하기 시작해 입주한지 3년이 지나면 거의 소멸하는 것으로 보고되었다⁵⁾.

미세먼지와 건축자재에서 나오는 화학오염물질 등이 문제점으로 대두되고 있으며, 특히 신축아파트에서의 새집증후군 문제가 가장 큰 문제점 중 하나로 떠올랐다. 이에 따라 환경부는 2004년 다중이용시설 등의 실내공기질 관리법을 제정하여 100세대 이상 신축 공동주택은 실내공기 질 측정 결과를 입주 전 입주민에게 공개하도록 하였다. 또한 2010년 이후부터는 100세대 이상 되는 아파트에서는 환기장치 설치가 의무화 되었다⁶⁾.

환기장치는 실내공기를 밖으로 내보내는 동시에 바깥공기를 실내로 끌어들이어 실내공간의 공기를 쾌적한 상태로 유지하는 설비이다. 대다수 아파트에 설치된 환기장치는 중앙에 사각형 모양의 전열소자를 갖춘 판형 환기설비를 사용 한다⁷⁾.

한국소비자원이 올해 2월 발표한 아파트 환기설비 안전실태 조사에 따르면, 수도권 아파트 24곳 중 4곳은 환기설비에 필터가 아예 없었으며, 나머지 20곳 중 14곳도 필터를 제때 교체해주지 않아 공기 정화 성능이 60% 미만 수준으로 떨어져 있었다. 심지어 조사대상 아파트 중 7곳은 주민들이 환기설비 위치조차 몰랐고, 14곳은 환기설비에 달린 필터를 주기적으로 교체해야

한다는 사실을 모르고 있었다. 건강한 실내공기를 원한다면 아파트에 이미 장착돼 있는 환기설비를 제대로 알고 활용해야 할 것이다⁸⁾.

미국과 유럽에서는 1990년대부터 실내오염물질들의 위해성 평가 및 관리 기술개발, 각종 신기술을 이용한 저감 방법 등에 초점을 맞추어 연구가 이루어지고 있는 것과 비교하여 우리나라는 1980년대 후반부터 실내공기오염에 대한 연구가 수행되었으나 지하철 공기질이 사회적 주 관심사가 되어 주요 연구 대상이었다. 하지만 2000년대부터 환경부에서 실내공기질 관리법 개정과 실내공기질 관리기본 계획이 수립되어 국내 실내공기오염 현황에 대한 연구 용역과 실내공기질 관리체계 역량발전을 위한 대책이 수행되었다. 또한 실내공기 오염물질에 대한 노출 평가 및 실내 공기질 건강위해성 평가연구 등이 수행되고 있으나 충분하지 못한 실정이다⁹⁾.

1.3 연구내용 및 방법

주거건물의 실내공기환경은 주거공간의 면적, 실내구조 형태, 창문 개방면적 및 개폐방식, 거주자 수, 환기량 등 다양한 설계변수에 따라 결정되며 실내 환기방식에 따라 실내공기오염물질의 방출, 확산, 분포 등이 달라진다¹⁰⁾.

따라서 본 연구에서는 신축아파트를 대상으로 서로 다른 환기방식을 적용하여 실내공기 오염물질의 농도변화를 분석하였으며, CFD프로그램 적용 및 건강위해성 평가를 실시하였다.

본 연구는 환기를 전혀 하지 않은 밀폐된 공간, 자연환기, 환기시스템, 환기시스템 설치와 공기청정기를 동시에 사용하는 방법 등 4가지 환기방법으로 환기평가를 실시하였다. 실험은 1차년도(2020년) 1월에서 3월까지 실시하였으며 오전 8시부터 오후 10시까지 진행하였다. 2차년도(2021년) 또한 1월에서 3월까지 같은 조건으로 같은 평형의 다른 가정을 대상으로 비교 분석하였다. 4가지 설정한 실험방법은 <Table 1>과 같다.

측정은 거주자의 프라이버시 보호를 위해 구성원의 공동 공간인 주방과 거실 두 공간으로 한정하여 측정하였다. 측정위치는 공간의 중앙에서 바닥으로부터 1.2~1.5m(입식)에서 공기질을 측정하였고, 측정시간은 오전 8시부터 오후 10시까지 2시간 마다 측정하였으며, 한번 측정 시 10분 간격으로 3번 반복 측정하여 평균치를 측정치로 사용하였다. 또한 측정하면서 거주자의 취사 등 개인 생활행위를 기록하였다. 실내 공기질에 대한 측정기기는 휴대형 실내공기질 종합측정기(Model: ISR-310)를 사용하였다.

<Fig. 1>은 환기 시스템과 공기청정기 사진이다. 환기시스템은 먼지제거, 알러지 유발물질제거, 새집증후군, 스모그와 생활냄새 등 유해가스를 제거 가능한 스마트 공조 시스템(DSA-400N)이었으며, 공기 청정기는 A사 제품(AS281DAW)으로, 탈

4) Kim, Yoon Shin, et al. A study of excess ratio for guideline of indoor air pollutants in classroom of kindergartens. J. Korean Soc. Indoor Environ, 4, 2007, pp.14-22.
5) 국립환경과학원, 신축 아파트 내 휘발성 실내공기 오염물질 변화추이, 3차년도 결과 발표, 2008, pp.8-12.
6) 서울시 실내 공기질 온라인 공개 -다중이용시설 등의 실내공기질관리법 제 9조.
7) 성기철, 장현재, 공동주택용 환기장치의 실내공기질 개선효과에 대한 현장실험연구, 설비공학논문집, 19(2), 2007, pp.202-211.

8) 소비, 자원. 아파트 환기설비안전실태조사, 2019.
9) Ryu, I. C., A Study Characteristic on Indoor Air Quality and Health Risk Assessment in Multi-use Facilities. A doctoral dissertation, Pukyong National University, 2010, pp.123-136.
10) 류영희, 이은정, 이경희, 공동주택 평면구성에 따른 실내공기질 평가에 관한 연구, 대한건축학회 논문집(계획계), 22(10), 2006. pp.279-286.

Table 1. Experimental method

구분	환기방식		측정조건
1-1	환기 안 함		환기를 하지 않고 정해진 시간을 설정하여 오염물질 농도 측정
1-2	자연환기		자연 환기만 실시하여 정해진 시간 간격을 설정하여 오염물질 농도 측정
1-3	기계환기	환기시스템	환기 시스템을 작동하기 전에 오염상태를 측정하고, 환기 시스템을 작동 후 정해진 시간을 설정하여 변화된 오염물질 농도 측정
1-4		환기시스템 + 공기청정기	환기 시스템과 공기청정기를 작동하기 전에 오염상태를 측정하고, 환기 시스템과 공기청정기를 동시에 작동한 후 정해진 시간을 설정하여 변화된 오염물질 농도 측정
2-1	환기 안 함		환기를 하지 않고 정해진 시간을 설정하여 오염물질 농도 측정
2-2	자연환기		자연 환기만 실시하여 정해진 시간 간격을 설정하여 오염물질 농도 측정
2-3	기계환기	환기시스템	환기 시스템을 작동하기 전에 오염상태를 측정하고, 환기 시스템을 작동 후 정해진 시간을 설정하여 변화된 오염물질 농도 측정
2-4		환기시스템 + 공기청정기	환기 시스템과 공기청정기를 작동하기 전에 오염상태를 측정하고, 환기 시스템과 공기청정기를 동시에 작동한 후 정해진 시간을 설정하여 변화된 오염물질 농도 측정

취, 미세먼지 및 새집증후군 등 유해물질 제거가 가능하다.



Fig. 1. Ventilation system and air cleaner model



Fig. 2. Measurement space floor plan

2. 측정 개요 및 건강 위해성 평가 방법

2.1 측정 개요

본 논문은 신축 아파트의 환기 방식에 따른 실내 공기질 변화를 파악하기 위해 현장조사 방식으로 실시하였다. 조사된 아파트 단지는 전주시에 위치한 2019년 3월 완공된 아파트로 총 644세대, 7동으로 면적은 80.57㎡~155.2㎡로 분양되었다. 측정 대상세대는 단지 내 중간 면적 117㎡로 같은 구조, 같은 층의 두 세대를 선정하였으며, 한세대씩 1년 간격으로 연도를 달리 측정하였다. 1,2차 실험의 거주자 정보는 성인2명, 아동2명으로 구성되어 있으며 모두 맞벌이 가정으로 일상생활을 하고 있다.

2.2 평가 방법

본 연구에서 실내환경에 대한 평가방법은 환기 방식에 따른 공기질 실태조사 분석 및 건강 위해성 평가로 나누어 평가하였다. 공기질 실태조사에 대한 분석은 2시간 간격(3회 반복)으로 연속측정을 통해 얻은 데이터를 하루 평균치로 정하여 비교하였고, 측정 공간 내 오염물질 농도가 「다중이용시설 실내공기관리법」에 실내 공기질 유지기준에 따라 주요 오염 원인을 확인하였다.

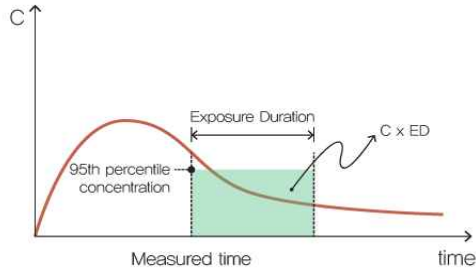
건강 위해성 평가는 비 발암 위해도 평가와 발암 위해도 평가 두 가지로 나뉜다. 비 발암 위해도는 Hazard Quotient(HQ)로 나타나며 염증이거나 신경계 질환 등 암을 제외한 질병들의 발병 가능성을 나타내는 지표이다. HQ가 1 이상이면 발병 가능성이 있다고 간주한다. 발암 위해도는 Excess Cancer Risk(ECR)라 표현되며 ‘초과발암위해도’라고도 한다. 초과발암위해도 발암 확률을 나타내는 값이며 EPA에서는 10⁻⁶~10⁻⁴범위를 권고하고 있으나 일반적으로 10⁻⁶위해수준(100,000명중 1명이상에 암 발생)을 기준으로 한다¹¹⁾.

US EPA¹²⁾(1989)에서는 원칙적으로 노출 평가 시 해당 기간 동안의 평균 농도를 사용한다고 규정하고 있다. 이때 정확한 평균값을 구할 수 없는 경우 확보된 농도 값들의 보수적인 평균값(일반적으로 95th percentile)을 사용할 것을 권고하고 있다¹³⁾¹⁴⁾.

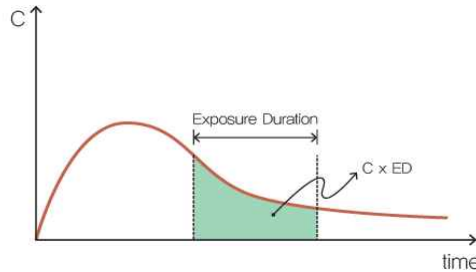
- 11) 김다영 외 3명, 수치 예측 모델을 이용한 공동주택 실내공기질 위해성 평가 방법, 한국건축환경설비학회 논문집, 10(1), 2016, pp.7-14.
- 12) US EPA. Risk-assessment guidance for superfund. Human health evaluation manual. Part A. Interim report (Final). No. PB-90-155581/XAB; EPA-540/1-89/002. Environmental Protection Agency, Washington, DC (USA). Office of Solid Waste and Emergency Response, 1989, Volume 1.
- 13) 임영욱, et al., 신축공동주택 휘발성유기화합물 (VOCs)로 인한 건강위해성 평가, 한국실내환경학회지, 3(3), 2006, pp.211-223.
- 14) Yang, Ji-Yeon, et al., Health Risk Assessment of Aldehydes and VOCs in the Activities Space of Young Children-Focused on Child-care Facilities and Indoor Playgrounds, Environmental health and toxicology, 25(1), 2010,

그러나 시간이 경과할수록 평균 농도가 감소하는 공동주택 실내 공기질의 특성상 장기적으로 보았을 때 이러한 방법은 과대평가의 위험이 있다.

반면 본 연구에서는 실제로 <Fig. 3> (b)와 같이 시간에 따른 변화를 반영 하였으며¹⁵⁾¹⁶⁾ 이에 따라 식 (1), (2)와 같이 해석단위별로 그래프 아래 면적을 계산하여 LADD 산출에 적용하였고, LADD 산출 치로 ECR 수치를 산출하였다.



a) Assessment by Measurement



b) Assessment by Estimation

Fig. 3. Method of Exposure Assessment

본 연구 중 위해성 평가 시 EPA에서 정하는 노출계수 기준을 이용하였으며, 위해성 계산중 호흡률은 <Table 2>에 나타난 바와 같이 한국 노출계수 핸드북¹⁷⁾에서 명시된 성인 남성의 호흡률 $15.7m^3/day$ 로 사용하였고, 평균시간은 원칙적으로 비 발암 독성 계산 시에는 20시간이고 발암 독성 계산 시에는 70년을 적용하였다¹⁸⁾.

$$TE = \sum \left(\frac{C_n + C_{n+1}}{2} \cdot t_n \right) \quad (1)$$

$$LADD = \frac{(TE/3600) \times (EF/24) \times IR}{BW \times AT \times 1000} \quad (2)$$

$$ECR = CFS \times LADD \quad (3)$$

C : 농도 [$\mu g/m^3$]
 C_n, C_{n+1} : $n, n+1$ 번째 시간대의 농도 [$\mu g/m^3$]
 TE : 총 노출량 [$(\mu g/m^3) \cdot sec$]
 t_n : n 번째 시간대의 길이 [sec]

Table 2. Health Risk Assessment Condition

Factors	Value	Reference
Inhalation Rate	$15.7 m^3/day$	Jang et al. 2014.
Body Weight	$85 kg$	-
	$90 kg$	
Exposure Frequency	$15 hr/day$	-
Exposure Duration	$14 hr$	-
Average Time	$20 hr / 70 yr$	EPA. 1989.

난류 계산 모델에서는 일반적으로 Standard k-ε 모델을 선택하여 계산하는데, 이 모델은 대량의 실험 데이터 검증이 거처 수정된 것이다.

Standard k-ε 모형 방정식은 Turbulence Kinetic Energy와 소모율을 기반으로 한다. k-ε 모형의 Turbulence Kinetic Energy k와 소모율 ε의 방정식은 다음과 같다.

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\mu_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (4)$$

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\mu_k} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

G_k : Turbulence Kinetic Energy k의 발생항목
 Y_M : 기체의 난류 맥동이 난류에 미치는 영향
 G_b : 부력에 의한 Turbulence Kinetic Energy
 G_k 의 계산법은 다음과 같다.

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (6)$$

μ_t : 난류 점성계수
 μ_t 의 계산법은 다음과 같다.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (7)$$

ε: Prandtl 수치
 σ_k : Turbulence Kinetic Energy k
 σ_ϵ : 소모율 ε

3. 측정 결과 및 분석

3.1 공기질 실태조사 분석

본 연구는 자연환기 및 기계환기 시 실내오염물질 농도 변화를 파악하고 대조군(환기 안 함)을 통해 신축 아파트의 환기방식별 오염물질 농도 비교 및 거주자 건강위해성 평가를 실시하였다. 측정대상 공간의 환기방식에 따른 오염물질 농도변화의

pp.57-68.

- 15) 김영희, 손부순, 양원호, 신축 주택의 톨루엔 발생량 모델을 이용한 건강위해성 평가, 한국환경보건학회지, 32(5), 2006, pp.398-403.
- 16) Park, Hyo Seon, Changyoon Ji, Taehoon Hong, Methodology for assessing human health impacts due to pollutants emitted from building materials, Building and Environment, 95, 2016, pp.133-144.
- 17) 장재연 외 7명. General Factors of the Korean Exposure Factors Handbook, 예방의학회지, 47(1), 2014, pp.7-17.
- 18) 김다영 외 3명. 수치 예측 모델을 이용한 공동주택 실내공기질 위해성 평가 방법, 한국건축환경설비학회 논문집, 10(1), 2016, pp.7-14.

실태조사는 아래와 같다.

Table 3. Simulation interpretation conditions.

Factors	Condition
Space	Three
Time	Steady
Material	Air
Flow	Segregated Flow
Fluid Condition	Constant Density
Viscosity	Turbulent
Reynolds	k-ε Turbulence
Simulation Number	2000

(1) VOC 농도 변화

<Fig. 4>에 따르면 비 환기시 1-1과 2-1에서 휘발성 유기화합물 농도는 환경부 유지기준을 초과하였고, 이는 실내가 밀폐상태인 환기 부족에 기인됨을 알 수 있었으며, 환기가 부족한 겨울철에 VOC의 농도가 더 증가한다는 것도 쉽게 예측할 수 있었다. 또한 환기방식을 보면 기계환기와 자연환기의 VOC 농도 수치는 비슷하게 나타났으나 기계환기가 자연환기보다 VOC 농도가 약간 낮게 나타났으며, 2차 년도의 2-4(환기시스템+공기청정기)가 적용된 VOC 농도가 가장 낮게 나타났다. 또한 1차 년도와 2차 년도 모두 환기시스템만 사용하는 경우보다 환기시스템과 공기청정기를 동시에 사용하는 경우가 20%-32%의 개선 효과가 더 있었다.

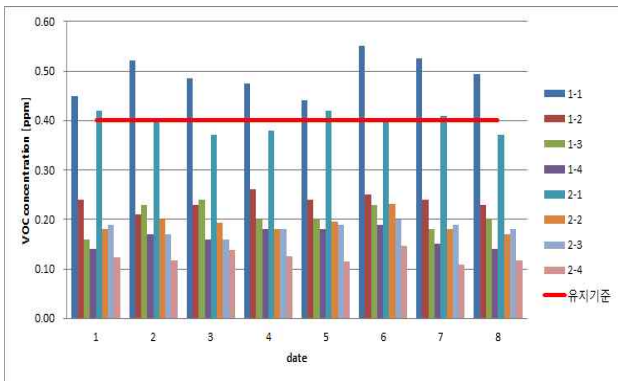


Fig. 4. Indoor concentration of VOC

(2) HCHO 농도 변화

<Fig. 5>와 같이 포름알데히드 농도는 측정 1차 년도와 2차 년도 모두 환경부 유지기준을 초과하였고, 특히 환기를 하지 않은 1-1과 2-1의 경우 포름알데히드 농도가 최고 0.35ug/m³를 초과하였다. 거주자가 장기간에 포름알데히드 농도 0.35ug/m³를 초과한 상태에서 거주할 경우 호흡장애 등의 증상이 나타날 수 다¹⁹⁾. 환기방식에서는 자연환기와 기계환기 모두 포름알데히드

농도는 환기 안할 때 보다 현저히 떨어졌음을 알 수 있었으며, 기계환기와 자연환기시의 포름알데히드 농도는 서로 비슷하게 나타났으나 모두 환경부 유지기준을 초과하였다. 이는 신축아파트의 포름알데히드의 다량 방출이 초기에는 환기를 하여도 어느 정도의 그 농도가 유지됨을 알 수 있었다. 그러나 환기시스템+공기청정기를 사용했을 시 다른 환기방법보다 근소한 차이로 가장 효과가 좋게 나타났으며, 환경부 유지기준에 근접하였다. 또한 1차 (2020년도) 실험에서 2차 (2021년도) 실험으로 시간이 경과됨에 따라 상대적으로 농도가 떨어짐을 알 수 있었다.

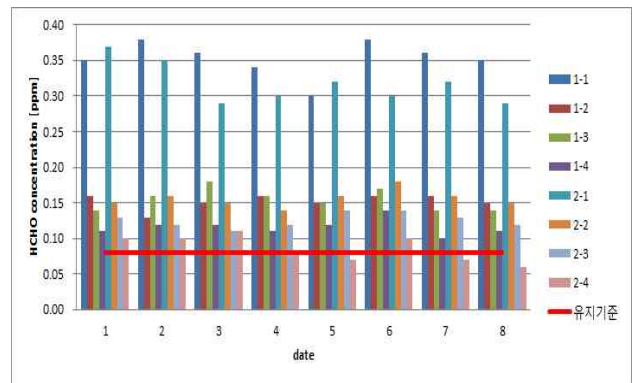


Fig. 5. Indoor concentration of HCHO

(3) CO 농도 변화

일반적인 신선한 외기에서의 일산화탄소 농도는 1ppm이고, 유지기준 10ppm 이하이다. 본 연구에서 측정된 일산화탄소의 농도는 모든 환기방식에서 환경부 유지기준을 초과하지 않았으며 가장 높은 수치는 0.19ppm로 나타났다. 이는 거주자들이 맞벌이어서 집에서 요리하는 시간이 비교적 적었으며, 모두 비흡연자였다.

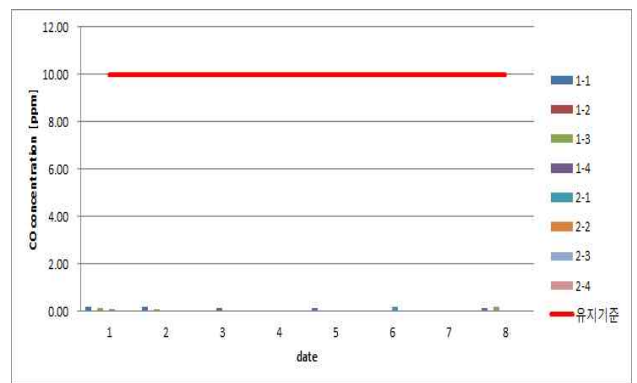


Fig. 6. Indoor concentration of CO

(4) CO₂ 농도 변화

이산화탄소는 무색, 무미, 무취이며, 이산화탄소의 농도가 높아진다는 것은 각종 오염물질이 발생할 가능성이 높아지기 때

19) 윤정숙, 최윤정, 주거실내환경학, 2014, p.105.

문에 실내 공기오염을 대표하는 요소로 취급된다. 이산화탄소 농도 1000ppm이 환경부 유지기준이며, 이 수치 이상일 경우 인체 호흡기, 순환기, 뇌 기능 등에 미치는 영향이 있다. <Fig. 7>에서 보는데와 같이 환기를 하지 않았을 때의 이산화탄소 농도는 1000~1400ppm 정도로 다소 유지기준 보다 높게 나타났으나, 기계환기와 자연환기를 할 때의 이산화탄소 농도는 모두 800ppm이하로 낮게 나타났다. 이 또한 거주자가 맞벌이 부부이고 실내 활동이 상대적으로 적었기 때문이다.

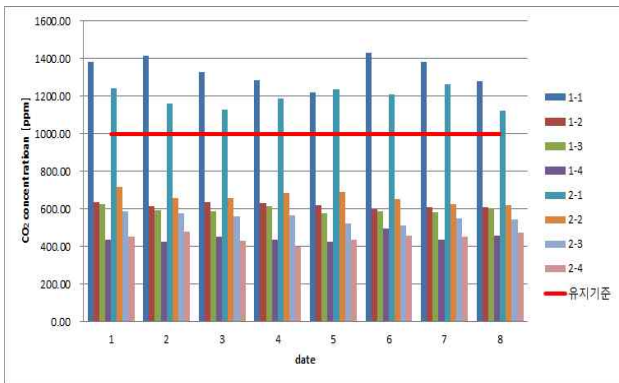


Fig. 7. Indoor concentration of CO₂

(5) PM2.5 농도 변화

PM2.5는 PM10에 비하여 인간이 호흡할 때 폐속 깊숙이 유입되어 건강에 심각한 영향을 미칠 수 있다. <Fig. 8>에서 나타난 바와 같이 초미세먼지의 농도 수치 변화는 환기방식에 따라 명확한 차이를 보였다. 1-1과 2-1의 경우 환기를 하지 않아 실내생활에서 발생한 PM2.5가 실내에 정체되었기 때문에 유지기준 보다 높게 나타났으며, 기계환기 및 자연환기 적용 시 모두 환경부 유지기준을 초과하지 않았다. 이 중 1-1이 2-1보다 높은 이유는 1차 년도 측정된 가정은 아이들의 활동량이 많은 초등학교생들이었으며, 2차 년도 측정된 가정은 상대적으로 활동량이 적은 유아 및 취학 전 아동이었다. 1-2와 2-2는 자연환기로 외부 PM2.5 농도의 영향을 받기 때문에 변화의 폭도 크게 나타났지만, 전반적으로 기계환기보다 오염 수치 농도가 높게 나타났다. 환기시스템과 공기청정기를 동시에 사용하는 경우 PM2.5 농도 변화가 가장 낮게 나왔으며, 이는 환기시스템과 공기청정기가

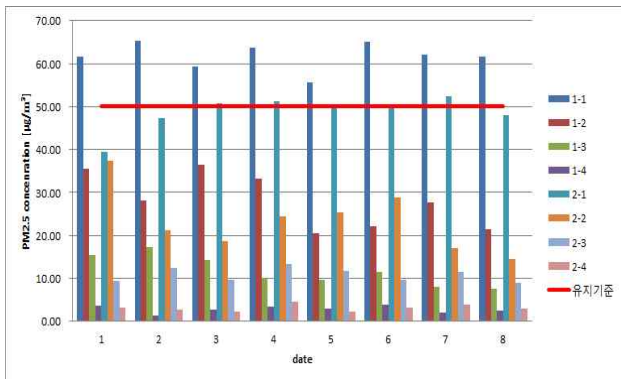


Fig. 8. Indoor concentration of PM2.5

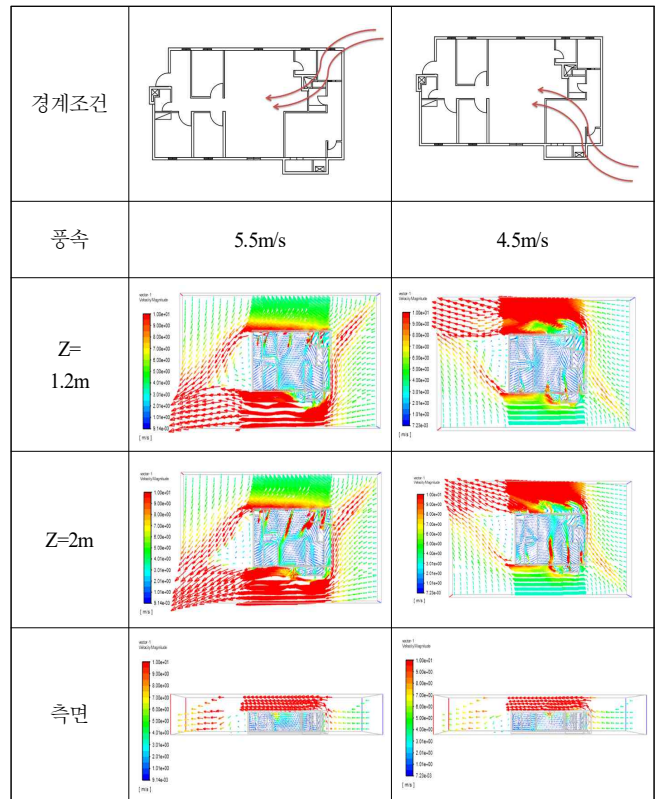


Fig. 9. Result of CFD simulation

PM2.5에 대한 뚜렷한 환기와 여과작용을 하였기 때문이며, PM2.5의 농도는 5ppm을 넘지 않았다.

3.2 CFD 시뮬레이션 결과

밀집된 고층 아파트에서는 일반적으로 창문을 통한 실내 공기의 환기가 어렵고, 특히 외기 풍속이 낮을 때에는 실내에서 발생하는 오염물질이나 요리 시 발생하는 오염물질이 실내공간에 축적되어 기계적인 환기가 필요하다²⁰⁾. 자연환기 시 실내 공기흐름에 대한 ANSYS Fluent 시뮬레이션 결과는 아래 <Fig. 9>와 같았으며, 시뮬레이션 중 선택된 풍속과 풍향은 1차 년도와 2차 년도에 측정된 최대풍속과 풍향을 적용하였다. 시뮬레이션 해석조건에서 시뮬레이션에서 적용된 높이는 사람 좌석 높이로 바닥으로부터 1.2m와 입석 높이인 2m로 하여 수평면 기류와 측면 기류 형태로 진행하였다. <Fig. 9>에서 보는데와 같이 풍속과 풍향이 실내 공기 흐름 속도에 영향을 있음을 알 수 있었다. 유입되는 바람의 속도와 유입 되는 방향의 창문 수로 인하여 풍속이 5.5m/s일 때, 실내의 공기 흐름 속도는 풍속이 4.5m/s일 때보다 더 빠르게 나타났다. 또한 풍향이 다를 때, 창문 개구부 위치의 기류는 실내 기류 속도보다 빠르게 나타났다. 따라서 실내 공기질은 실외 기류 속도뿐만 아니라 건물의 창문수, 개구부 위치도 실내 공기질에 미치는 영향이 있음을 알 수 있었다.

<Fig. 9>의 측면 시뮬레이션을 보면 건물의 단면 기류속도를

20) 김무현, 황지현, 자연급기-강제배기 환기시스템을 적용한 공동주택의 환기에 따른 실내 온열 및 공기환경 특성, 대한건축학회 논문집(계획계), 28(4), 2012, pp.223-232.

나타냈으며, 창문 높이에서는 바람의 방향과 창문이 협각을 이루어져 있어 실내 상부의 기류 속도가 하부의 기류 속도보다 빨라 환기효과가 더 좋게 나타났다. 또한 풍속이 4.5m/s일 때 유입 풍 방향의 창문 높이가 풍속 5.5m/s일 때 보다 높았으며, 유입되는 기류 방향이 풍속 5.5m/s보다 구조상 실내로 더 쉽게 통과하는 위치에 있어 실내 기류 속도가 5.5m/s보다 빠르게 나타났다.

<Fig. 9>에서 나타난 바와 같이 바람이 부는 상태에서도 실내 오염 공기가 중앙부분에 정체 되어 신속히 배출되지 않는다는 것을 알 수 있었다.

3.3 건강 위해성 평가

환기 방식에 따른 오염물질 측정 결과 자연환기와 기계환기 모두에서 일산화탄소, 이산화탄소, 휘발성유기화합물 및 초미세먼지의 농도가 환경부 유지기준 이하로 나타나 위해성 평가 대상에서 제외 시켰다. 그러나 포름알데히드의 경우에는 자연환기 및 기계환기 모두 환경부 기준치를 초과하여 포름알데히드에 대해서 건강 위해성 평가를 실시하였다. 위해성 평가 시 성인과 아동으로 구분하였으며, 각각 체중과 노출 시간을 계산 수치로 평가하였다. 본 연구는 <Fig. 3>을 참고하여 초과발암위해도(Excess cancer risk, ECR)를 산출하였다.

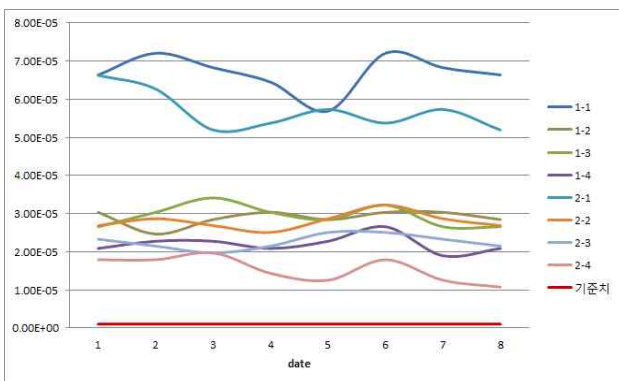


Fig. 10. Adult mean Excess cancer risk

거주자 정보 수치를 대입하여 초과발암위해도 결과를 <Fig. 10>과 <Fig. 11>에 나타냈다. <Fig. 10>은 성인을 측정할 일일 평균 농도하의 산출 결과이다. case별 HCHO의 평균 ECR은 성인의 경우 1-1에서 가장 큰 수치인 7.21×10^{-5} 로 나타났으며, 이 수치는 거주자 평생 초과발암위해도 십만명 당 7명으로 산출되어 허용 위해도를 초과하였다. 가장 낮은 수치로 나타난 환기시스템+공기청정기를 사용한 평가치가 1.07×10^{-5} 로 나타나 기준치보다 조금 높았다.

<Fig. 11>은 어린이를 측정할 일일 평균 농도하의 산출 결과이다. 1-1과 2-1은 밀폐된 공간에서 성인보다 어린이에게 영향이 더 큰 것으로 나타났으며, 최대값은 3.03×10^{-4} 이며, 기준치 10^{-4} 보다 큰 것으로 나타났다. 또한 1-4와 2-4의 수치가 가장 낮게 나타났으며, 이는 기계환기와 공기청정기를 함께 사용함으로써 인한 환기와 여과가 동시에 작용되었음을 알 수 있었다.

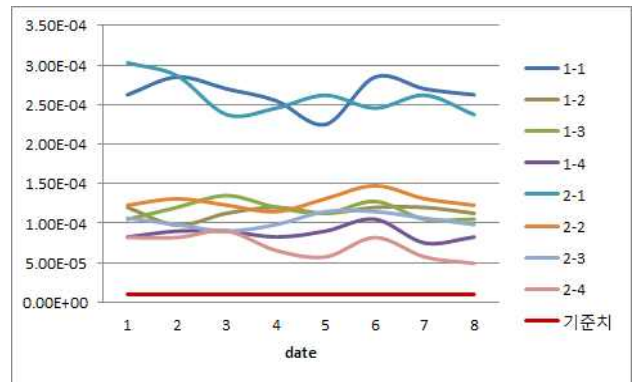


Fig. 11. Child mean Excess cancer risk

<Fig. 10>에서 나타난 바와 같이 1차 실험 결과를 보면 어린이의 위해성평가가 성인의 4배로 나타났으며, 2차 실험 결과에서도 어린이의 위해성평가는 성인의 4.6배로 나타났다. 이는 어린이가 성인보다 위해성에 매우 민감함을 알 수 있었다.

4. 결론

환기방식에 따른 신축아파트의 실내공기 중 오염물질의 농도 변화, 원인 및 위해성 평가 결과는 다음과 같다.

실내 밀폐 시 실내 오염물질의 농도는 환기를 하지 않은 밀폐된 공간에서 가장 높게 나타났으며 다음으로 자연 환기, 기계 환기 순이었다.

포름알데히드를 제외한 나머지 오염 물질의 농도는 자연환기 및 기계환기에서 환경부 유지 기준 이하로 떨어졌다. 포름알데히드의 농도는 모든 환기방법에서 기준치를 초과 하였으나 환기시스템 + 공기청정기를 사용 시 환경부 유기기준에 근접하였다. 이처럼 신축아파트의 포름알데히드의 다량 방출이 초기에는 환기를 하여도 어느 정도의 농도가 유지됨을 알 수 있었다.

환기방식에 따른 PM2.5의 농도 변화는 서로 간에 명확한 차이를 보였다. 환기시스템과 공기청정기를 동시에 사용하는 경우에서 PM2.5 농도가 가장 낮게 나타났으며, 이는 환기와 여과가 동시에 작용을 하였기 때문이다.

자연환기 시 실내공기 흐름에 대한 시뮬레이션 결과는 풍속과 풍향의 영향으로 인하여 실내 공기의 흐름 속도에 영향이 미치고 있음을 알 수 있었으며, 바람이 있는 상태에서도 실내 오염 공기가 중앙부분에 정체 되어 신속히 배출되지 않는다는 것을 알 수 있었다.

위해성 평가 결과 측정 당일 평균치로 계산하였을 때 성인의 경우 1차 년도에서 환기를 하지 않은 상태의 HCHO 평균 ECR이 7.21×10^{-5} 로 매우 높게 나타났다. 또한 성인과 어린이의 위해성 평가를 비교해 보면, 1차 년도 측정에서는 어린이의 위해성 평가 결과가 성인의 4배로 나타났으며, 2차 년도에서도 어린이가 성인의 4.6 배로 높게 나타났다. 이는 어린이가 성인보다 위해성에 매우 민감함을 알 수 있었다.

이상의 결과를 종합해보면 환기 방식에서 기계 환기는 자연

환기보다 그 효과가 더 좋게 나타났다. 그러나 신축아파트에서는 초기에 포름알데히드 농도가 환기를 하여도 기준치를 초과함을 알 수 있었으며, 위해성평가에서 위해도가 높게 나타났다. 따라서 건축 개발 시 해당 지역의 주요 풍향과 자연 입지를 충분히 고려하여 가장 일반적이고 쉬운 자연환기의 효과를 높일 필요가 있다. 또한 친환경적인 실내 건축재료의 사용이 매우 중요하며, 입주 전 충분한 Bake-out을 실시함이 필요하다. 또한 입주 후 충분한 환기 및 실내식물 도입 등 지속적인 관리가 필요하다.

참고문헌

1. 김다영 외 3명, 수치 예측 모델을 이용한 공동주택 실내공기질 위해성 평가 방법, 한국건축환경설비학회 논문집, 10(1), 2016.
2. 김무현, 황지현, 자연급기-강제배기 환기시스템을 적용한 공동주택의 환기에 따른 실내 온열 및 공기환경 특성, 대한건축학회 논문집-계획계, 28(4), 2012.
3. 김영희, 손부순, 양원호, 신축 주택의 톨루엔 발생량 모델을 이용한 건강위해성 평가, 한국환경보건학회지, 32(5), 2006.
4. 류영희, 이은정, 이경희, 공동주택 평면구성에 따른 실내공기질 평가에 관한 연구, 대한건축학회 논문집-계획계, 22(10), 2006.
5. 박진철, 신축공동주택에서의 포름알데히드 및 휘발성 유기화합물 측정 연구, 중앙대학교 석사학위논문, 2004.
6. 서울시 실내 공기질 온라인 공개 -다중이용시설 등의 실내공기질관리법 제9조.
7. 성기철, 장현재, 공동주택용 환기장치의 실내공기질 개선효과에 대한 현장실험연구, 설비공학논문집, 19(2), 2007.
8. 소비, 자원, 아파트 환기설비안전실태조사, 2019.
9. 국립환경과학원, 신축 아파트 내 휘발성 실내공기 오염물질 변화추이,

- 3차년도 결과 발표, 2008.
10. 윤정숙, 최윤정, 주거실내환경학, 교문사, 2014.
11. 임영욱 외, 신축공동주택 휘발성유기화합물 (VOCs) 로 인한 건강위해성 평가, 한국실내환경학회지, 3(3), 2006.
12. 장재연 외 7명, General factors of the Korean exposure factors handbook, 예방의학회지, 47(1), 2014.
13. 환경정책기본법과 수도권 대기환경 개선특별법.
14. Kim, Yoon Shin et al., A study of excess ratio for guideline of indoor air pollutants in classroom of kindergartens, J. Korean Soc. Indoor Environ, 4, 2007.
15. Lee, S. C. and M. Chang, Indoor and outdoor air quality investigation at schools in Hong Kong, Chemosphere, 41(1-2), 2000.
16. Park, Hyo Seon, Changyoon Ji, and Taehoon Hong, Methodology for assessing human health impacts due to pollutants emitted from building materials, Building and Environment, 95, 2016.
17. Ryu, I. C., A study characteristic on indoor air quality and health risk assessment in multi-use facilities. Doctoral dissertation, Pukyong National University, 2010.
18. US EPA, Risk-assessment guidance for superfund. Volume 1. Human health evaluation manual. Part A. Interim report (Final). No. PB-90-155581/XAB; EPA-540/1-89/002, Environmental Protection Agency, Washington, DC (USA), Office of Solid Waste and Emergency Response, 1989.
19. Yang, Ji-Yeon, et al., Health risk assessment of aldehydes and VOCs in the activities space of young children-focused on child-care facilities and indoor playgrounds, Environmental Health and Toxicology, 25(1), 2010.

접 수 일 자 : 2021. 10. 08
 초 심 완 료 일 자 : 2021. 11. 16
 계 재 확 정 일 자 : 2021. 11. 21