

시간활동양상 및 이산화탄소 농도를 이용한 한국 주택 환기량 추정

박진현* · 류현수* · 허정* · 조만수* · 양원호*†

*대구가톨릭대학교 산업보건학과

Estimation of Ventilation Rates in Korean Homes Using Time-activity Patterns and Carbon Dioxide (CO₂) Concentration

Jinhyeon Park*, Hyeonsu Ryu*, Jung Heo*, Mansu Cho*, and Wonho Yang*†

*Department of Occupational Health, Daegu Catholic University

ABSTRACT

Objectives: The purpose of this study was to estimate the ventilation rate of residential homes in Korea through tracer gas methods using indoor and outdoor concentrations of carbon dioxide (CO₂) and CO₂ generation rates from breathing.

Methods: In this study, we calculated the number of occupants in a home by time through data on the average number of people per household from the Korean National Statistical Office and also measured the amount of CO₂ generation by breathing to estimate the indoor CO₂ generation rate. To estimate the ventilation rate, several factors such as the CO₂ generation rate and average volume of residential house provided by the Korean National Statistical Office, indoor CO₂ concentrations measured by sensors, and outdoor CO₂ concentrations provided by the Korea Meteorological Administration, were applied to a mass balance model for residential indoor environments.

Results: The average number of people were 2.53 per household and Koreans spend 61.0% of their day at home. The CO₂ generation rate from breathing was 13.9±5.3 L/h during sleep and 15.1±5.7 L/h in a sedentary state. Indoor and outdoor CO₂ concentrations were 849 ppm and 407 ppm, respectively. The ventilation rate in Korean residential houses calculated by the mass balance model were 42.1 m³/h and 0.71 air change per hour.

Conclusions: The estimated ventilation rate tended to increase with an increase in the number of occupants. Since sensor devices were used to collect data, sustainable data could be collected to estimate the ventilation rate of Korean residential homes, which enables further studies such as on changes in the ventilation rate by season resulting from the activities of occupants. The results of this study could be used as a basis for exposure and risk assessment modeling.

Key words: Breathing rate, indoor air quality, time-activity pattern, tracer gas methods, ventilation rate

I. 서론

사람은 하루의 80% 이상을 실내에서 보내며 한국인은 하루의 87.5%를 실내에서 보내기 때문에 공기 오염물질에 대한 노출은 대부분 실내공기질의 영향을 받는다. 특히 집에서 보내는 시간은 하루의 62.9%

로 가장 많은 시간을 보내고 있어 일반 주택의 실내공기질은 인체에 영향을 미치는 주요한 요소 중 하나라고 할 수 있다.¹⁾

미국 EPA (Environmental Protection Agency)에서는 실내공기질을 개선하기 위한 3가지 기본 전략 중 하나로 환기를 제안하고 있으며, 환기를 통해 실내

†Corresponding author: Department of Occupational Health, Daegu Catholic University, Gyeongbuk, Korea, Tel: +82-53-850-3739, Fax: +82-53-850-3736, E-mail: whyang@cu.ac.kr

Received: 29 January 2019, Revised: 18 February 2019, Accepted: 20 February 2019

의 온도를 조절하거나 실내 공기오염물질을 희석 또는 제거함으로써 실내공기질을 개선시킬 수 있다.²⁾ 또한 사람들은 실외의 공기를 마시고자 하는 욕구가 있으며, Ring 등(2008)에 따르면 창문을 개방하여 환기할 경우 정화되지 않은 외부 공기가 유입되더라도 실내공기질에 대한 만족도가 높아졌음을 알 수 있다.³⁾ 그러나 환기상태가 불량할 경우에는 실내 공기오염물질을 효과적으로 제거하지 못할 수 있어 사람의 건강에 악영향을 야기할 수 있다.⁴⁾ 실내 공기오염물질은 뇌졸중, 허혈성 심장 질환, 만성 폐색성 폐질환, 급성 상기도 감염 및 폐암 등을 유발할 수 있으며,⁵⁾ 세계보건기구(World Health Organization, WHO)에 따르면 매년 수백만 명의 사람들이 실내 공기오염물질로 인하여 사망한다고 보고하였다.⁶⁾

때문에 적절한 환기를 통하여 실내공기질을 개선시키기 위해 ‘건축물의 설비기준 등에 관한 규칙’의 ‘공동주택 및 다중이용시설의 환기설비 기준 등’에서는 2013년 개정을 통해 신축 또는 리모델링하는 100세대 이상의 공동주택 등은 시간당 공기 교환 횟수(Air Changes per Hour, ACH)를 0.5 ACH 이상으로 하기 위하여 자연환기설비 또는 기계환기설비를 설치할 것을 명시하고 있다.⁷⁾ 그러나 공동 주택 또는 다중이용시설이 아닌 일반 주택과, 신축 또는 리모델링이 되지 않는 주택들은 이러한 사항이 적용되지 않는다. 뿐만 아니라 환기량의 주기적인 측정에 관한 내용도 명시되어 있지 않아 다중이용시설이 아닌 일반 주택에 대한 환기량의 측정은 어려운 실정이다.⁷⁾

환기는 동력을 이용하여 강제로 외기와 내기를 순환시키는 기계적인 환기와 대류에 의한 자연환기로 구분할 수 있다. 기계적 환기는 사용자가 환기장치를 조절하여 환기량을 조절할 수 있으나 자연환기는 창문의 개폐 여부, 날씨, 외기의 풍속, 기온 등 많은 요소에 의해 영향을 받기 때문에 기계적 환기에 비해 변동이 심하며, 환기량의 예측에도 많은 어려움이 있다.

주로 사용되는 환기량의 측정방법은 실내 기체의 시간에 따른 농도 감소율을 이용하는 추적가스법이 있으며, 주로 사용되는 추적가스는 과불화탄소(perfluoro carbon, PFCs), 육불화황(SF₆), 이산화탄소(CO₂) 등이 있다.⁸⁾ PFCs나 SF₆를 이용할 경우 인위적으로 추적가스를 실내에서 발생시켜야 한다는 단

점이 있다. CO₂는 사람의 호흡에 의해 발생하므로 환기량 추정에 사용될 수 있으나 측정 중에 재실자가 있을 경우 혼란변수로 작용할 수 있다. 뿐만 아니라 사람의 호흡에 의해 발생하는 CO₂를 이용할 경우 CO₂ 발생량이 일정하지 않아 이를 조절할 수 없다는 한계가 있다. 그러나 CO₂는 PFCs와 SF₆에 비해 공기 중 농도 측정이 용이하며, 사람의 호흡에 의해 발생하므로 실내 발생원을 인위적으로 만들 필요가 없다는 장점이 있어 본 연구에서는 추적가스로서 CO₂를 이용하였다.⁹⁾

본 연구에서는 사람의 호흡에 의한 CO₂ 발생량과 실내의 CO₂ 농도를 물질수지식에 적용하여 우리나라 일반 주택에서의 시간에 따른 환기량의 변화와 하루 중 평균 환기량을 추정하고자 하였다.

연구방법

1. 이산화탄소 발생량

일반 주택에서의 호흡에 의한 CO₂의 발생량을 추정하기 위하여 시간에 따른 가구당 평균 재실자 수를 계산하였다. 각 가구당 재실자 수는 통계청에서 제시하는 인구 총 조사의 2016년 ‘주택(오피스텔포함)의 종류 및 주거면적별 가구(일반가구)’에서 비거주용 건물 내 주택을 제외한 단독주택, 아파트, 연립주택, 다세대주택, 오피스텔의 가구 수와 가구원을 이용하여 계산하였다.¹⁰⁾

또한 통계청에서 제공하는 2014년 생활시간조사 자료를 분석하여 시간당 주택 재실 비율(%)을 계산하였고, 이것을 우리나라 가구당 평균 인구수에 적용하여 각 가구의 시간당 평균 재실자 수를 구하였다.¹¹⁾ 통계청 생활시간조사는 5년을 주기로 실시하고 있으며, 12,000 가구의 만 10세 이상 가구원 약 28,000명을 대상으로 하였다. 조사기간은 2014년 7월 16~30일(15일간), 9월 16일~10월 1일(16일간), 11월 25일~12월 10일(16일간)에 조사되었으며, 10분 간격으로 설계된 시간일지에 자신이 한 행동을 일기 쓰듯이 응답자가 2일 동안 직접 기입하는 방식으로 이루어졌다.¹²⁾

재실자의 호흡에 의한 1인당 CO₂ 발생량을 구하기 위하여 만 19~64세 성인을 대상으로 2018년 8월부터 12월까지 CO₂ 발생량을 실측하였다. 연령에 따라 만 19~24세, 만 25~34세, 만35~44세, 만45~54

Table 1. Number of respiratory rate measurement participants

Age	Number of participants		
	Male	Female	Total
19~24	19	19	38
25~34	19	19	38
35~44	20	19	39
45~54	19	21	40
55~64	19	20	39
Total	96	98	194

세, 만55~64세의 5개의 연령대로 구분하였으며, 고혈압, 당뇨, 비만, 흡연자는 대상에서 제외한 194명을 대상으로 하였다(Table 1). CO₂ 발생량은 마스크를 착용하고 호기와 흡기가 새어나지 않도록 한 뒤, Quark b2 (COSMED, Italy)를 통해 측정하였다. 집에서의 활동의 운동 부하 수준은 수면과 휴식 및 가벼운 활동(sedentary) 정도의 운동 부하라고 가정하여 의자에 앉아 5분간 휴식을 취한 뒤 안정 상태에서 10분 동안 CO₂ 발생량을 측정하였다. 또한 수면시의 호흡량은 EPA에서 제공하는 연령 및 성별에 따른 호흡량의 비를 적용하여 추정하였다.¹³⁾

2. 실내 · 외 이산화탄소 농도

실내의 CO₂ 농도는 실외의 CO₂ 농도에 영향을 받을 수 있으므로, 실외에서의 CO₂ 농도를 고려하여 실내에서의 CO₂ 발생량을 계산하였다. 실외의 CO₂ 농도는 기상청에서 제공하는 우리나라의 2016년 연간 평균 CO₂ 농도를 적용하였다. 실내 CO₂ 농도는 2015년 9월부터 2016년 8월까지 약 1년 동안 7,500 가구를 대상으로 CO₂ 농도 측정 센서가 장착된 IoT (Internet of Things) 공기청정기를 이용하여 CO₂ 농도를 측정하였다. 기기의 정확도는 약 95%였으며, 공기청정기 위치는 사용자의 편의에 따라 설치되었다. 센서의 CO₂ 측정 원리는 비분산 적외선 방법 (Non-dispersive infrared, NDIR)으로 측정된 데이터는 1분 간격으로 평균하여 공기청정기 판매사의 실내공기질 관리 플랫폼에 저장되었다. 본 연구에서는 수집된 데이터의 한 시간 평균 농도를 이용하였다.¹⁴⁾ CO₂ 농도는 또한 본 연구에서 사용된 공기청정기에는 CO₂를 제거하는 기전이 없어 실내 CO₂ 농도에는 영향을 미치지 않았다.

3. 주택 체적

환기량 및 시간당 공기 교환 횟수의 산출을 위하여 통계청 자료 및 국립환경과학원 고시의 일반 노출계수에 명시된 ‘생활공간별 면적 및 부피’를 이용하여 2016년의 가구당 체적을 계산하였으며, 공기청정기의 주 설치 장소가 거실임을 고려하여 거실의 체적을 계산하였다.

4. 실내공기질 물질수지식을 이용한 환기량 추정

일반 주택에서의 환기량을 추정하기 위하여 실내 공기질의 물질수지식(식 1)을 적용하였다.¹³⁾

$$V \frac{dC_i}{dt} = mQC_o + G - mQC_i - R \tag{1}$$

where, C_i=indoor concentration (ppm), C_o=outdoor concentration (ppm), Q=ventilation rate (m³/h), G=generation rate (mL/h), R=removal rate (mL/h), V=volume of the space (m³), t=time (h), m=mixing factor, (0≤m≤1).

이 때, 실내 공간에서 CO₂는 완전히 혼합되며(m=1), 일반 주택에서의 CO₂의 실내 제거인자는 없는 것으로(R=0) 가정하였다. 계산된 환기량의 시간에 따른 변화를 관측하였으며, 환기량이 대수 정규분포를 보이는 점을 고려하여 환기량의 일 기하평균을 구하였다.¹⁵⁾ 또한 시간에 따른 CO₂ 농도 변화량의 변이계수가 1% 미만인 구간은 정상상태(steady-state)로 가정하였다.

III. 연구결과

1. 이산화탄소 발생량

통계청의 2016년 ‘주택(오피스텔포함)의 종류 및 주거면적별 가구(일반가구)’에 따르면 단독주택, 아파트, 연립주택, 다세대주택, 오피스텔의 총 가구 수는 18,964,758 가구이며, 가구원은 47,893,068명으로 가구당 인구수는 약 2.53명으로 나타났다.

2014년 생활시간조사 자료를 이용하여 시간당 주택 재실 비율을 분석한 결과, 하루 중 주택에서 보내는 시간은 61.0%인 것으로 나타났으며, 23시부터 5시의 주택 재실율은 90% 이상이었다(Fig. 1). 이 결과를 가구당 인구수에 적용한 결과, 하루 중 평균

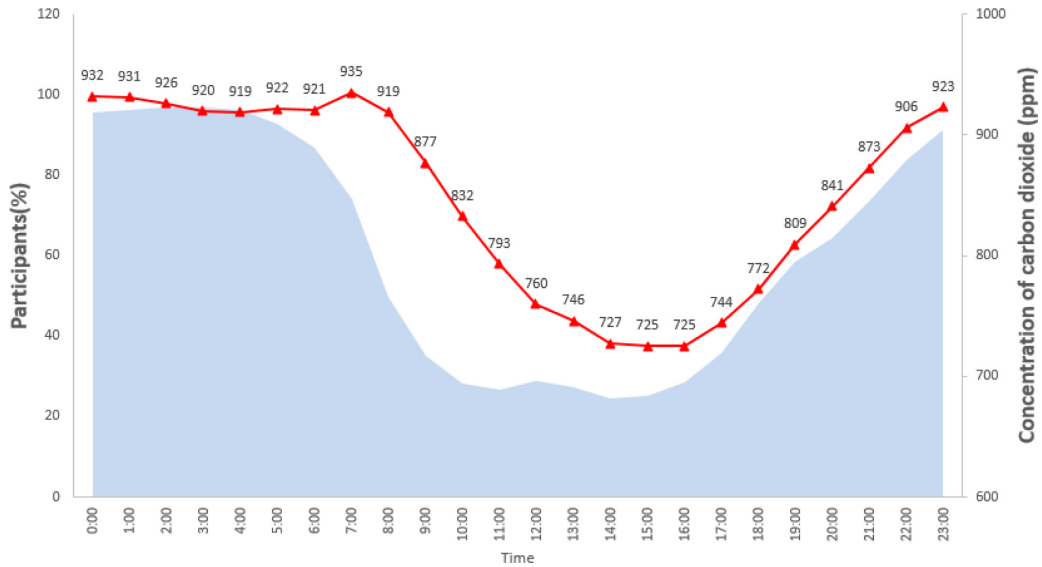


Fig. 1. Percentage of occupants at home and indoor CO₂ concentration.

Table 2. Amount of CO₂ generation by breathing per person

Sex	Age	Amount of CO ₂ generation per person (L/h)	
		Sleep	Sedentary
Male	19~24	18.2	19.7
	25~34	17.1	18.5
	35~44	15.6	16.9
	45~54	16.2	17.6
	55~64	16.2	17.6
	Mean	16.7	18.0
Female	19~24	11.4	12.3
	25~34	13.3	14.4
	35~44	11.2	12.1
	45~54	9.6	10.4
	55~64	10.7	11.7
	Mean	11.2	12.1
Total	19~24	14.8	16.0
	25~34	15.2	16.4
	35~44	13.5	14.6
	45~54	12.8	13.8
	55~64	13.4	14.6
	Mean	13.9	15.1

주택 재실 인구수는 약 1.54명으로 나타났다.

194명을 대상으로 측정한 호흡에 의한 CO₂ 발생량은 수면 시 13.9±5.3 L/h, 휴식 시에는 15.1±5.7 L/h로 나타났으며 성별 및 연령에 따른 CO₂ 발생량은 아래의 Table 2에 나타내었다. 또한 환기를 추정할 위한 CO₂ 발생량의 행동 부하는 재실 비율이 90% 이상인 23시부터 5시는 수면으로, 그 외 시간은 휴식인 것으로 가정하였다.

2. 실내 · 외 이산화탄소 농도

실외 CO₂ 농도는 기상청에서 제공하는 2015~2016년 대기 중 CO₂ 평균 농도인 407 ppm을 적용하였다.¹⁷⁾ 주택 실내 CO₂ 농도는 하루 평균 849 ppm이었으며, 15시와 16시에 최저 725 ppm, 7시에 최대 935 ppm으로 나타났다(Fig. 1). 실내 CO₂ 농도는 22시부터 8시에는 실내 CO₂ 농도가 900 ppm 이상이었으며, 해당 시간대의 CO₂ 농도 변화량은 평균 923 ppm 표준편차 7.9 ppm으로 나타나 변이계수가 0.86%로 농도가 일정하게 유지됨을 확인할 수 있었다. 또한 14~16시에는 평균 726 ppm, 표준편차 1.2 ppm으로 0.16%의 변이계수를 나타내어 22~8시, 14~16시에는 실내 CO₂ 농도가 정상 상태인 것으로 하였다.

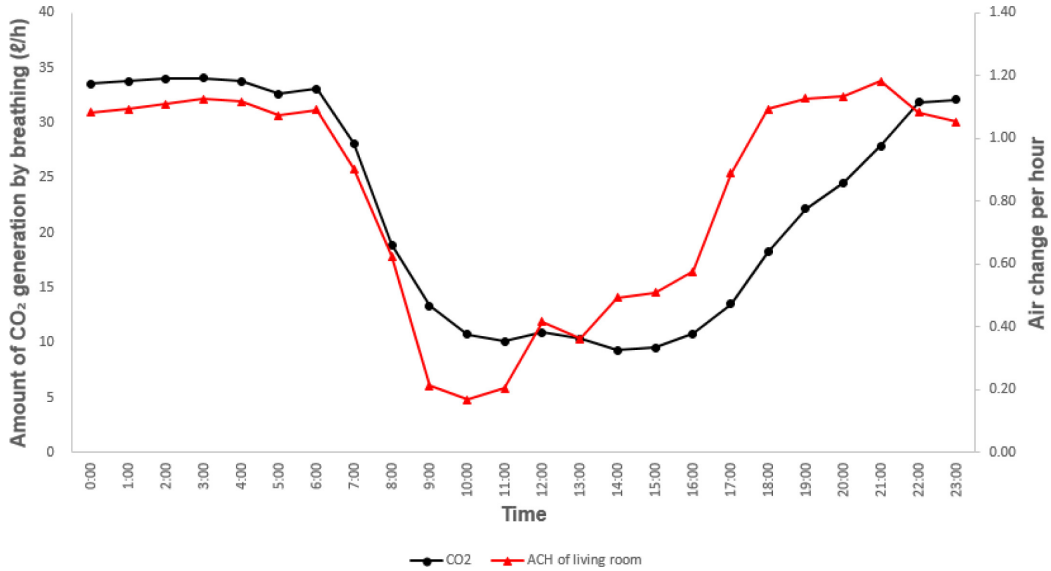


Fig. 2. Amount of CO₂ generation and air changes per hour.

3. 주택 체적

통계청에 따르면 비거주용 건물 내 주택을 제외한 단독주택, 아파트, 연립주택, 다세대주택, 오피스텔의 2016년 가구당 주거면적은 평균 69 m²이며, 국립환경과학원 고시에 명시된 생활공간의 높이는 2.5 m로 가구당 평균 체적은 172.6 m³으로 나타났다. 평균 거실 체적은 국립환경 과학원 고시에 명시된 생활공간 부피 중 거실의 비율인 34.2%를 적용하여 59.0 m³을 사용하였다.

4. 실내공기질 물질수지식을 이용한 환기량 추정

실내공기질 물질수지식(식 1)을 이용해 산출한 한국 주택의 평균 환기량은 42.1 m³/h로 추정되었으며 거실의 평균 공기 교환 횟수는 0.71 ACH로 산출되었다. 최대 환기량은 21시에 69.8 m³/h, 최대 공기 교환 횟수는 1.18 ACH, 최소 환기량과 최소 공기 교환 횟수는 11시에 각각 9.9 m³/h, 0.17 ACH로 나타났다(Fig. 2).

IV. 고 찰

본 연구결과를 Table 3에 요약하여 나타내었다. 우리나라의 가구당 인구수 2.53명을 2014 생활시간조사 자료를 이용한 주택 재실 비율에 적용한 결과,

하루 중 22~6시에는 가구당 평균 재실 인원이 2명 이상이었으며, 7~8시, 18~21시의 가구당 평균 재실 인원은 1~2명, 9~17시에는 1명 이하인 것으로 나타났다. 가구당 평균 재실 인원이 아침 7시부터 2명 이하로 감소하는 것은 직장의 출근 및 등교를 위해 집을 떠나기 때문인 것으로 판단되며, 11시까지 계속 감소하다 12시에 다소 증가하는 경향을 보이는데, 이것은 오전 근무자의 귀가 또는 점심 식사를 위한 방문으로 판단할 수 있다. 18시부터 가구당 평균 재실인원이 1명 이상으로 증가하기 시작하는 것은 학생의 하교 및 직장인의 퇴근 등 일과를 마친 뒤의 귀가 등이 원인인 것으로 유추할 수 있다.

가구의 재실인원이 감소함에 따라 사람에 호흡에 의한 CO₂의 발생량이 감소하므로 실내 CO₂ 농도 또한 감소하는 경향을 보였으며, 재실인원이 증가함에 따라 실내 CO₂ 농도 또한 증가하였다. 시간에 따른 CO₂ 농도의 증가 및 감소는 재실 인원의 증가 및 감소보다는 시간적으로 조금 늦은 경향을 보였으며, 농도 및 재실 인원이 증가할 때 보다는 감소할 때 시간적인 차이가 더 나타났다. 그 이유는 일반적으로 외출 시에 문단속으로 인하여 공간이 밀폐되어 환기량이 줄어들기 때문에 CO₂ 농도의 감소에 걸리는 시간이 짧기 때문인 것으로 판단되며, 실제로 재실자 인원이 감소함에 따라 시간당 공기 교환 횟수

Table 3. Summary of process to estimate ventilation rate of this study

Time	Residents at home		Activity	CO ₂ generation per person		Total CO ₂ generation (L/h)	CO ₂ Con. (ppm)	Volume of living room (m ³)	Tendency of CO ₂ concentration	Q (m ³ /h)	ACH
	(%)	(No.)		(L/min)	(L/h)						
0	95.4	2.41				33.5	932		63.9	1.08	
1	96.2	2.43				33.8	931		64.5	1.09	
2	96.7	2.44	Sleep	0.23	13.9	34.0	926	59.0	Steady-state	65.5	1.11
3	96.9	2.45				34.1	920			66.4	1.13
4	96.1	2.43				33.8	919			65.9	1.12
5	92.8	2.34				32.6	922			63.4	1.07
6	87.0	2.20				33.1	921		64.4	1.09	
7	73.9	1.87				28.1	935		53.3	0.90	
8	49.6	1.25				18.9	919		36.9	0.62	
9	35.2	0.89				13.4	877		12.6	0.21	
10	28.3	0.71				10.8	832		9.9	0.17	
11	26.7	0.67				10.1	793	Decay	12.1	0.20	
12	28.7	0.73				10.9	760		24.6	0.42	
13	27.2	0.69				10.3	746		21.4	0.36	
14	24.5	0.62	At rest	0.25	15.1	9.3	727		29.1	0.49	
15	25.1	0.63				9.6	725	30.0	0.51		
16	28.4	0.72				10.8	725	34.0	0.58		
17	35.6	0.90				13.5	744	52.5	0.89		
18	48.1	1.21				18.3	772		64.6	1.09	
19	58.4	1.47				22.2	809	Growth	66.5	1.13	
20	64.5	1.63				24.5	841		67.0	1.13	
21	73.4	1.85				27.9	873		69.8	1.18	
22	83.8	2.12				31.9	906		63.9	1.08	
23	91.3	2.31	Sleep	0.23	13.9	32.1	923	Steady-state	62.2	1.05	
Mean	61.0	1.54		0.25	14.7	22.4	849	59.0	42.1*	0.71*	
S.D	29.0	0.73		0.01	0.5	10.1	80	-	1.85**	1.85**	

G=generation by breathing, Q=ventilation rate, ACH=air change per hour

*geometric mean, **geometric standard deviation

가 감소하는 것이 관측되었다.

본 연구결과 계산된 휴식 시 성인의 호흡에 의한 CO₂ 발생량은 15.1±5.7 L/h로, ASHRAE에서 제공하는 미국 성인의 앉았을 때의 호흡에 의한 CO₂ 발생량 18.6 L/h (=0.31 L/min)보다 낮은 것으로 나타났다. Persily와 Jonge(2016)는 기초대사량과 MET (metabolic equivalent of task)를 이용하여 CO₂ 발생량을 계산하는 공식을 제시하였다. 본 연구의 참여자들의 특성을 적용하여 산출한 결과 1.4 MET에서

의 CO₂ 발생량은 17.8 L/h로 본 연구에서의 실측 데이터의 결과와 유사하게 나타났다.¹⁸⁾

주택의 환기량은 6시부터 감소하는 경향을 나타내었는데, 이것은 출근 및 등교 등으로 인하여 집을 떠날 경우 문단속 등의 실내 밀폐로 인한 환기량 감소로 유추할 수 있으며, 12시에 평균 재실 인원의 증가와 동시에 환기량이 증가함이 관찰되는데, 사람의 출입에 의한 환기량의 증가로 판단된다. 일 평균 환기량은 42.1 m³/h로, ASHRAE에서 권고하는 한

사람당 평균 환기량인 7.5 L/sec와 하루 평균 재실 인원 1.54명으로 계산한 환기량인 41.6 m³/h와 유사하게 나타났다. 또한 국내 선행연구와 비교하였을 때, 허윤 등(2009)이 전산유체역학을 이용해 연구한 아파트의 환기량 42.9 m³/h와 유사하게 나타났으며,¹⁹⁾ 시간당 공기 교환 횟수는 0.71 ACH로 나타나 양원호 등(2003)이 이산화질소의 농도를 통해 추정된 값인 1.36 ACH보다 낮게 나타났다.²⁰⁾

일반 주택의 실내환기량은 실내·외 온도의 영향을 받으므로 실내·외 온도차가 클수록 환기량이 증가하는 경향이 있으나 여름과 겨울에는 냉·난방을 위하여 주택의 기밀성을 높여 환기량이 감소될 수 있다.²¹⁾ 또한 실내·외 온도차가 크지 않을 경우에는 대류가 잘 발생하지 않아 자연 환기량이 감소할 수 있다. 최석용 등(2006)이 실내·외 온도 차가 크지 않으며 밀폐된 일반 아파트의 샘플하우스에서 시간당 공기 교환 횟수를 측정할 결과 0.21~0.25 ACH로 나타났다. 이것은 창호공사가 완전히 이루어지지 않은 상태에서 측정하였기 때문에 실제 사용자가 입주할 경우에는 환기율이 더 낮아질 것으로 판단하였다. 따라서 실제 생활 환경을 고려하여 기계환기장치를 설치하여 실내 환기율을 높일 것을 주장하였다.²²⁾

현재 국립환경과학원 고시의 일반 노출계수에 명시된 거실의 시간당 공기 교환 횟수는 0.5 ACH로, 유럽의 노출평가 시에 사용되는 덴마크 EPA에서 제공하고 있는 실내 공기 교환 횟수인 0.5 ACH를 그대로 사용하고 있어 주택 구조, 계절에 따른 실내·외 온도 차이, 생활 양식의 차이 등과 같은 우리나라의 주거환경 특성이 고려되지 않았을 가능성이 있다.²³⁾

뿐만 아니라 주택의 환기량은 창문의 개폐, 실내·외 온도 차, 풍향 및 풍속에 따라 달라지며 측정에 많은 시간과 비용이 소요되기 때문에 사람이 실제 생활하는 환경에서의 환기량 측정은 많은 한계가 있다. 이러한 한계점 때문에 환기량을 측정할 대부분의 기존 연구는 실내가 밀폐되었으며, 재실자가 없는 상태에서의 환기량, 즉 침투량(infiltration) 및 공기 누출량(air leakage rate)을 제시하고 있어,^{24,26)} 본 연구는 우리나라 주택에서 거주자가 생활하고 있는 실제 생활환경에서의 실제 환기량을 추정했다는 점에서 의의가 있다.

본 연구에서 사용된 CO₂ 농도는 시중에 상업용으로 판매되는 공기청정기의 데이터를 사용했다는 점에서 여러 한계가 있다. 공기청정기를 구매하기 어려운 빈곤계층이 고려되지 못한 점과, 측정 지역이 명확하지 않고 무작위로 선정된 점, 설치 장소가 거실로 가정되었다는 점과 실내 한 곳에서만 측정되었다는 점의 한계가 있다. Shuqing 등(2015)의 CO₂를 이용한 추적가스법을 통하여 환기율을 연구한 결과에 따르면, 여러 개의 센서 설치가 어려우며 교차환기(cross-ventilation) 또는 기계적 환기가 있는 환경에서는 실내 공기가 배기되는 곳에 센서를 설치하는 것이 적절한 방법이다.²⁷⁾ 또한 실내 재실자가 모두 성인으로 가정되어 재실자 중 어린이가 있을 수 있다는 제한점이 있었다. 그러나 일반 주택에서의 환기량 측정이 어려움에도 불구하고 7,500 가구의 실측 데이터를 이용하여 의미있는 실내·외 환기량을 평가하였다고 판단한다. 본 연구의 결과는 우리나라의 거주지에서 공기오염물질 노출평가에 이용될 수 있는 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

V. 결 론

본 연구에서는 통계청의 생활시간 조사자료와 우리나라의 평균 주택 체적, IoT 공기청정기의 CO₂ 센서를 통해 측정된 실내 CO₂ 농도와 연평균 대기 중 CO₂ 농도를 물질수지식에 적용하여 일반 주택에서의 환기량을 평가하였다. 주택의 환기량은 재실 인원의 변화와 유사한 경향을 보였으며, 7시부터 감소하는 경향을 보이고 10시에 최저가 되었다. 이후 증가하는 추세를 보이다 21시에 최고가 되었다. 본 연구는 우리나라의 거주용 주택 전체를 대상으로 하여 노출 및 위해성 평가를 위한 모델링을 위한 기초자료로 활용될 수 있다. 또한 생활 양식 변화로 인한 계절에 따른 환기량 변화량 연구와 같은 추가적인 연구가 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 생활공간환경보건기술사업의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호: 2018001350001).

References

1. Yang W, Lee K, Park K, Yoon C, Son B, Jeon J et al. Microenvironmental Time Activity Patterns of Weekday and Weekend on Korean, Korean Journal of Environmental Health. 2009; 29(10): 267-274.
2. United State Environmental Protection Agency. Improving Indoor Air Quality. https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/improving-indoor-air-quality#Ventilation_Improvements [accessed 22 January 2019]
3. Ring E, Brager G, Occupant Comfort, Control, and Satisfaction in Three California Mixed-mode Office Buildings. ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings. 2000; 8.314-8.328.
4. Sundell J. On the history of indoor air quality and health. Indoor Air. 2004; 14(7): 51-58.
5. Pérez-Padilla R, Schilman A, & Riojas-Rodriguez H. Respiratory health effects of indoor air pollution. The International Journal of Tuberculosis and Lung Disease. 2010; 14(9): 1079-1086.
6. World Health Organization. 7 million premature deaths annually linked to air pollution. <https://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-pollution/en/> [accessed 22 January 2019]
7. The Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs. Regulation for Facility in Building. 2009.
8. Mochida K, Hattori M, Tanaka Y, Kashihara S, Yoshida K, Tajima M et al. Ventilation measurement using PFT method. Indoor Air. 2008.
9. Moon J, Park M, Cha K, Lee J. Measurement of air change rate in an underground parking lot with natural ventilation by trace gas method. The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea Winter Annual Conference. 2002; 479-483.
10. KOSIS. Korean Statistical Information Service. Population Census. 2016. [accessed 22 January 2019]
11. Korean National Statistical Office. Time use survey. 2014.
12. Ryu H, Yoon H, Eom I, Park J, Kim S, Cho M et al. Time-activity pattern assessment for Korean student. Korean Journal of Environmental Health. 2018; 44(2): 143-152.
13. Lordo B, Sanford J, Mohnson M, Schuda L, Moya J. Metabolically Derived Human Ventilation Rates: A Revised Approach Based Upon Oxygen Consumption Rates (Final Report, 2009). Environmental Protection Agency. 2009. p. 4-1-4-14.
14. Kim J, Lee B, Lee K, Kim T, Yoon H, Kang S et al. Indoor thermal environmental big data from IoT. Korean Society of Indoor Environment Annual Conference. 2016. 137-138.
15. Yang W, Bae H, Chung M. Korean Journal of Environmental Health. 2002; 28(2): 183-192.
16. Yang W, Bae H, Lee K, Chung M. A study on the error associated with ventilation rate calculation using different sampling intervals. Korean Journal of Environmental Health. 2000; 26(3): 50-54.
17. Korea Meteorological Administration. Report of Global Atmosphere Watch 2016. 2017. p. 16-19.
18. Persily A and de Jonge L. Carbon dioxide generation rates for building occupants. Indoor Air. 2017; 27(5): 868-879.
19. Huh Y, No S, Kim K. A Study about Natural Ventilation Analysis Methods for Apartment Buildings Using CFD. Journal of the architectural institute of Korea. 2009; 25(6): 221-228.
20. Yang W, Lee K, Chung M. Characterization of indoor air quality using multiple measurements of nitrogen dioxide. Indoor Air. 2003; 14(2) 105-111.
21. Yeom H, Park J. Evaluation of Natural Ventilation Rate Based on Indoor CO₂ Concentration. Architectural Institute of Korea Conference Proceedings. 2018; 38(1): 376-379.
22. Choi S, Kim S, Yee J. The effect on indoor air quality improvement by ventilation rate in newly built apartment. Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering. 2006; 18(8): 649-655.
23. Jacobsen E, Nielsen I, Schjøth-Eskesen J, Fischer C, Larsen P, Andersen D, Risk assessment of 3D printers and 3D printed products. The Danish Environmental Protection Agency. 2017; 161: p. 28-35.
24. Chan W, Joh J, Sherman M. Analysis of air leakage measurements of US houses. Energy and Buildings. 2013; 66: 616-625.
25. Lee D, Ji K, Jo J. Study on the establishment of large building airtightness measurement standards. Journal of the Korean Solar Energy Society. 2014; 34(1): 117-124.
26. Lee K, Kim S, Sohn J. The Comparison of Measured and Calculated Air Leakage Rate caused by Wind Pressure and Temperature Difference in High-Rise Apartments. Architectural Institute of Korea Conference Proceedings. 2004; 24(2): 1127-1130.
27. Shuqing C, Michaël CC, Pascal S, Dominique M. CO₂ tracer gas concentration decay method for measuring air change rate. Building and Environment. 2015; 84: 162-169.

<저자정보>

박진현(대학원생), 류현수(대학원생), 허 정(대학원생), 조만수(교수), 양원호(교수)