

# 주택에서 대기의 실내공기질 영향

○ 배귀남 | 한국과학기술연구원 환경복지연구단  
 단장  
 E-Mail : gnbae@kist.re.kr

## 1. 서론

산업화로 다양한 오염물질들이 사업장의 굴뚝을 통해 대량으로 배출되어 심각한 대기오염을 일으켜 생활환경을 위협하는 사회적 문제로 대두되어 국가적 차원에서 배출시설의 배기가스 규제가 실시되었다. 또한, 자동차가 보편화되면서 배기가스에 포함된 질소산화물과 휘발성 유기화합물이 광화학 스모그 현상을 일으켜 시정을 악화시키고 대기 중 오존 농도를 증가시키는 대기오염 문제가 발생되어 자동차 배기가스도 규제의 대상이 되었다. 최근에는 세계보건기구(WHO)에서 경유 자동차에서 배기되는 나노 크기의 디젤입자가 발암물질로 규정되어 새로 시판되는 경유 자동차는 배기되는 나노입자의 개수도 규제를 받게 되었다.

국가에서는 국민 건강을 보호하기 위하여 법적으로 대기질(air quality) 기준을 제정하여 관리하고 있다. 황사, 자동차 매연, 스모그 등의 대기오염 현상을 경험한 사람들은 대기오염 관리의 중요성을 잘 인식하고 있다. 최근 겨울철 중국의 극심한 초미세먼지(PM2.5) 오염이 우리나라에도 영향을 미치게 되어 대기오염에 대한 국민적 관심은 매우 높은 실정이다(배귀남, 2014; 김유미 등, 2015).

한편, 인류가 문명화되면서 추위, 더위, 비, 눈 등 열악한 기후환경을 극복하기 위하여 야외 생활에서

점차 건축물로 외부와 차단되어 있는 실내공간에서 생활하는 시간이 늘어나게 되었다. 미국 환경보호청(EPA)에서는 환경오염의 노출을 평가하기 위하여 1992-1994년 동안 미국 전역에 걸쳐 9,386명을 대상으로 인간의 활동패턴을 조사하여 발표하였는데(Klepeis et al., 2001), 그림 1에 나타난 바와 같이 사람들은 실내에서 86.9%의 시간을 보내고 이 중 68.7%의 시간을 주거공간에서 생활하고 있었다. 국내에서도 양원호 등(2009)이 국립환경과학원의 지원을 받아 통계청의 2004년 생활시간조사 자료를 분석하여 주중에는 실내공간에서 87.56%를 보내고 이 중 주거공간에서 59.27%를 생활하며, 주말에는 실내공간에서 87.45%를 보내고 이 중 주거공간에

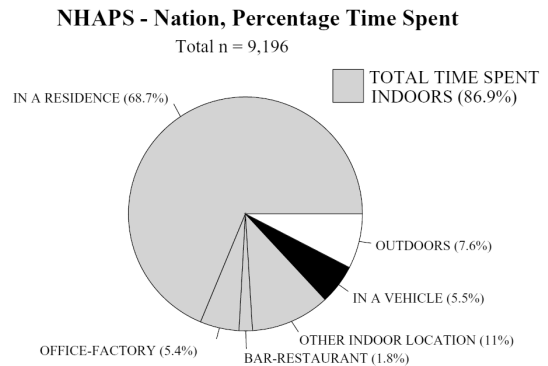


그림 1. 미국인의 활동패턴 조사에 의한 실내공간별 체류시간 비율(Klepeis et al., 2001)

서 67.20%를 생활하는 것으로 보고하였다. 이처럼 현대인들이 실내에서 87% 이상의 시간을 보내고 있으므로, 호흡을 통해 인체로 유입되는 오염물질의 실내 농도가 실제로 인체의 건강에 중요하게 영향을 미치게 된다. 즉, 황사, 디젤입자와 같은 대기 중 오염물질도 실내로 유입되어야 비로소 실내에서 생활하는 사람의 건강에 영향을 미치게 된다.

따라서 대기오염이 인체의 건강에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 대기가 건축물을 통과하면서 실내공기질(indoor air quality)에 영향을 미치는 과정을 이해할 필요가 있다. 또한, 오염물질별 실내외 농도비(indoor to outdoor concentration ratio, I/O ratio)를 통해 대기의 실내공기질 영향을 정량적으로 파악할 수도 있다.

## 2. 대기와 실내공기의 교환

대형건물, 병원, 아파트, 단독주택 등 건축물은 구조적으로 외부와 격리되어 있지만, 공조시스템(heating, ventilating, and air-conditioning system, HVAC system), 창문, 출입문, 구조적 틈 등을 통해 공기가 이동하면서 실내공기질이 대기의 영향을 받고 있다. 대기와 실내공기가 교환되는 현상을 환기(ventilation)라고 부르며, 그림 2에 나타난 바와 같이 환기는 크게 기계환기(mechanical ventilation)와 자연환기(natural ventilation)로 구분되고, 건축물의 구조적 틈에 의해 대기가 실내로 침투하는 것을 침기(infiltration)라 부르고, 거꾸로 실내공기가 외부로 빠져나가는 것을 누기(exfiltration)라고 부른다.

그림 3에 예시한 바와 같이 보통 대형건물의 공조시스템은 일정량의 공기를 외부에서 도입하여 실내로부터 재순환되는 공기와 혼합시켜 실내공간으로 공급하는데, 이때 공기 중 미세먼지를 제거하기 위하여 중성능필터를 통과시킨다. 그러나 아파트와 같은 주거건물에는 공조시스템이 없어 주로 자연환기에 의존하고 있다. 최근 건축된 아파트의 경우 환기설비의 설치가 의무화되어 외부공기를 실내로 도

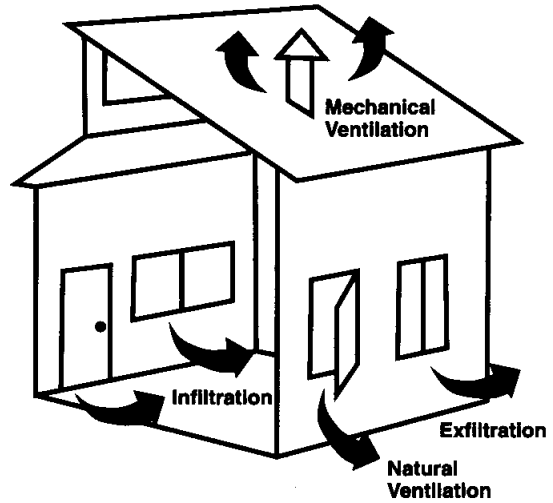


그림 2. 환기의 종류(Godish, 2001)

입하여 환기시키고 있지만, 필터가 설치되어 있지 않아 외부공기가 심하게 오염되어 있는 경우 오히려 실내공기질을 악화시킬 우려가 있다.

공기오염물질은 보통 미세먼지, 석면과 같은 입자상물질, 이산화질소, 휘발성 유기화합물과 같은 기체상물질, 세균, 곰팡이, 바이러스와 같은 생물학

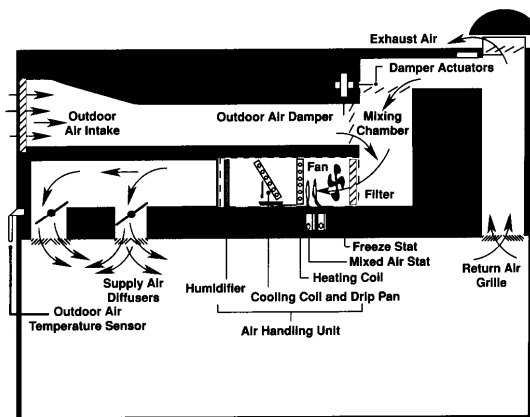


그림 3. 대형건물 공조시스템의 구조 (Godish, 2001)

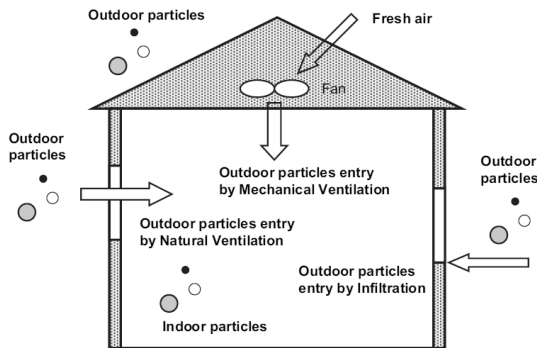


그림 4. 대기 중 입자의 실내환경으로 이동 경로 (Chen and Zhao, 2011)

적물질로 구분할 수 있다. 기체상물질과 달리 입자상물질은 형상이 있어 크기에 따라 실내에서 복잡한 거동을 일으켜 정밀한 해석이 필요하다. 그림 4는 대기 중 입자가 다양한 경로를 통해 실내환경으로 이동하는 것을 나타낸 것이다(Chen and Zhao,

2011). 건축물의 실외(outdoor)와 실내(indoor) 공기 중 입자의 상관성을 나타내는 정량적인 지표로 실내외 농도비(I/O ratio), 침기계수(infiltration factor) 및 침투계수(penetration factor)가 사용되고 있다. 실내외 농도비는 가장 쉽게 이해할 수 있고 널리 사용되는 지표이다.

침기계수는 대기 입자가 실내로 침투하여 부유 상태로 남아있는 분율을 나타낸 것으로 침투계수, 입자침착률, 실내입자발생율의 함수로 표현된다. 그림 5에 나타낸 바와 같이 미국과 유럽에서 조사한 미세먼지(PM10)와 초미세먼지(PM2.5)의 침기계수는 각각 0.17-0.52, 0.3-0.82로 넓게 분포하는데, 대체로 PM2.5의 침기계수가 PM10보다 큼을 알 수 있다(Chen and Zhao, 2011). 침투계수는 건물 틈을 통한 침기 시 입자의 분율을 의미한다. 그림 6에 예시한 바와 같이 실제 건물에서 침투계수는 입자의 크기에 따라 달라지는 것으로 조사되었다(Chen and Zhao, 2011).

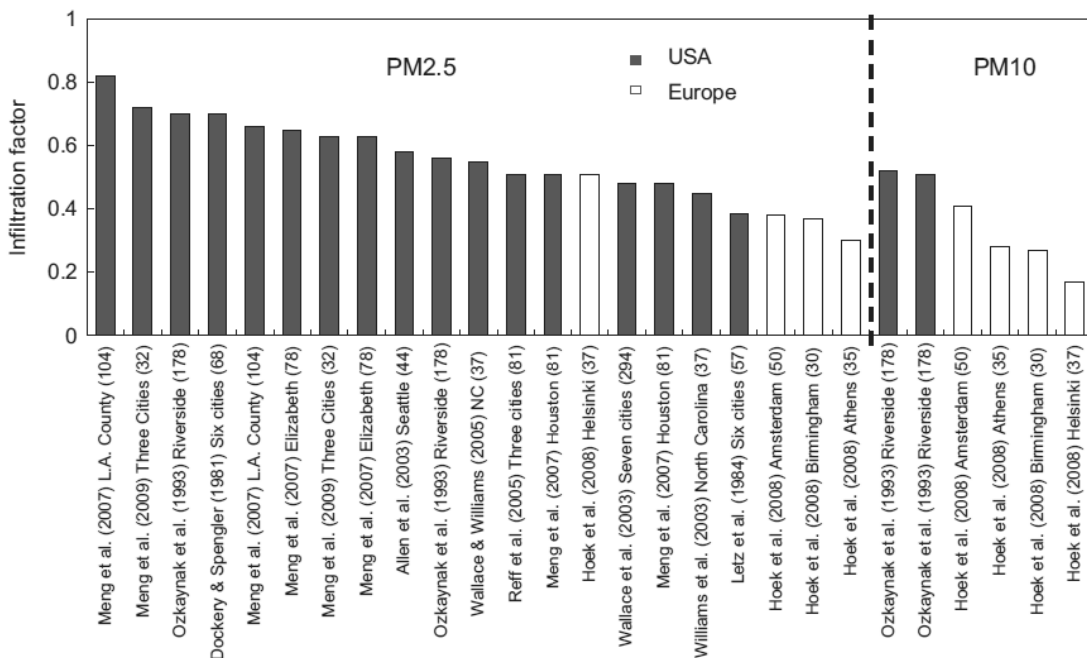


그림 5. 다양한 연구에서 구한 PM10과 PM2.5 침기계수의 분포(Chen and Zhao, 2011)

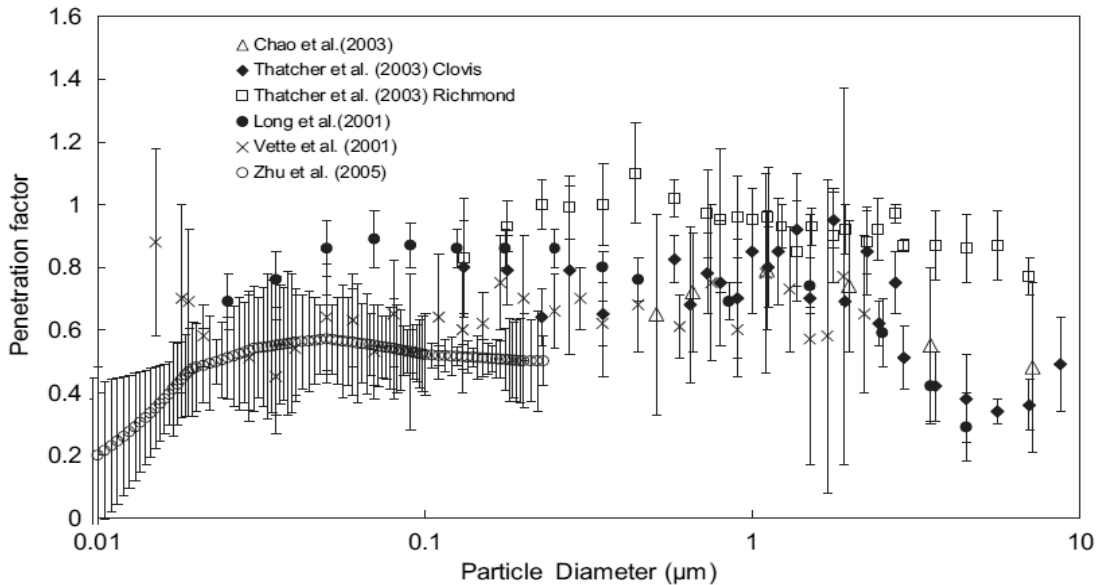


그림 6. 실제 건물에서 실험적으로 구한 입경별 침투계수의 분포(Chen and Zhao, 2011)

### 3. 실내외 농도비

대기가 실내공기질에 미치는 영향을 파악하거나 실내공간에 존재하는 오염물질의 주된 배출원이 실내 또는 실외인지를 판단하는데 실내외 농도비(I/O ratio) 지표가 널리 사용되고 있다. 실내외 농도비는 비교적 쉽게 구할 수 있지만 의미를 해석하기 위해서는 실내외 농도비에 영향을 미치는 인자를 이해할 필요가 있다. 그림 7에 나타난 바와 같이

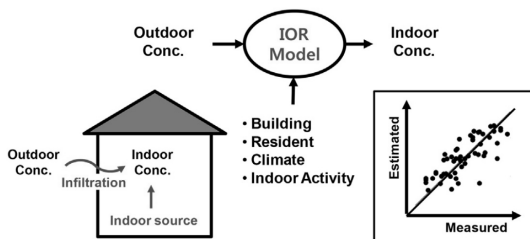


그림 7. 실내외 농도비에 영향을 미치는 인자 (Lee et al., 2016)

대표적인 인자로는 건물특성, 재실자, 기후조건, 실내활동이 있으며, 실내활동으로는 조리, 청소, 자연 환기 등이 영향을 미친다.

그림 8은 2001-2002년 동안 벨기에의 15개 주택에서 측정된 미세먼지(PM10), 초미세먼지(PM2.5) 및 극미세먼지(PM1)의 실내외 농도비를 나타낸 것인데, 실내외 농도비가 1보다 큰 주택 3, 7, 8, 9, 12의 경우 흡연자가 살고 있는 것으로 조사되었다(Stranger et al., 2007).

그림 9는 2007-2009년 동안 인도 중북부 지역 주택에서 다양한 입자크기별 실내외 농도비와 기상 인자(기온, 상대습도 및 풍속)의 관계를 월별로 분석하여 나타낸 것이다. 대체로 기온이 상승하고 풍속이 빨라지면 실내외 농도비가 감소하는 경향을 나타내는 것으로 해석하였다. 또한, 그림 10에 나타난 바와 같이 도로변(roadside)과 도시대기(urban) 지역의 주택에 대한 실내외 농도비를 비교하였다.

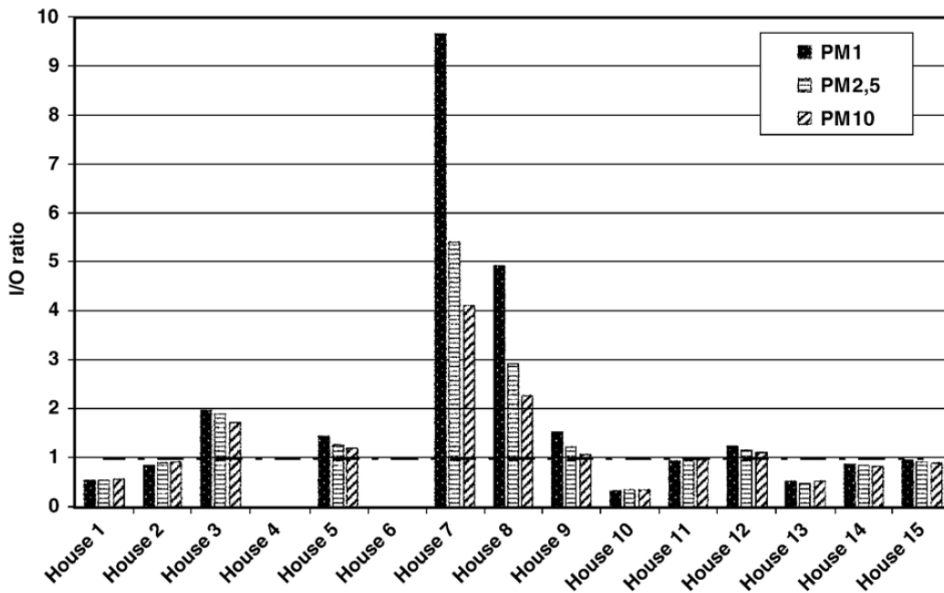


그림 8. 벨기에 주택에서 다양한 입자크기에 따른 실내외 농도비 분포(Stranger et al., 2007)

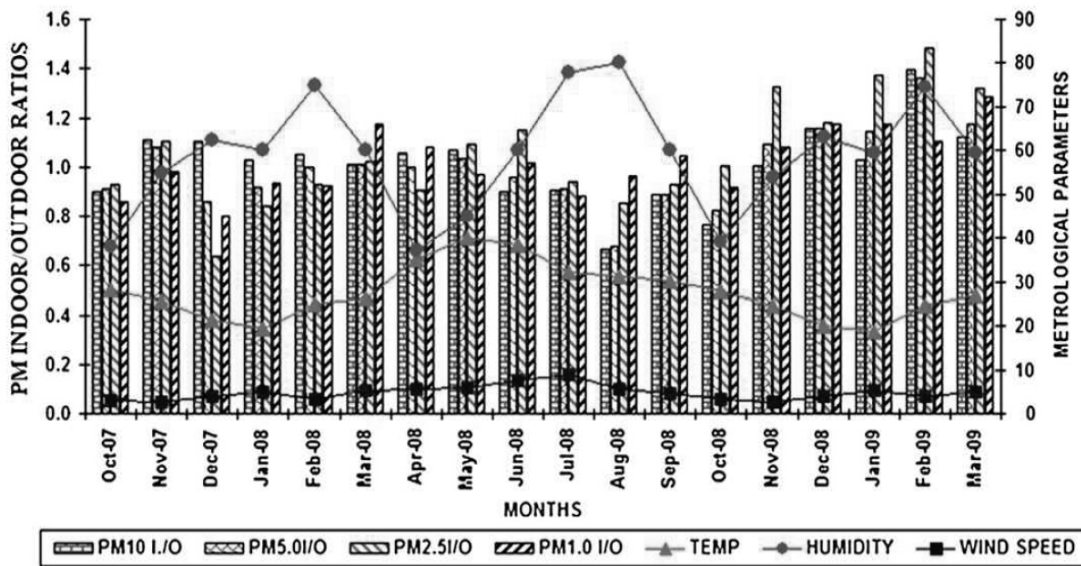


그림 9. 인도 주택에서 다양한 입자크기별 실내외 농도비와 기상인자(기온 °C, 상대습도 %, 풍속 km/h)의 상관성(Massey et al., 2012)

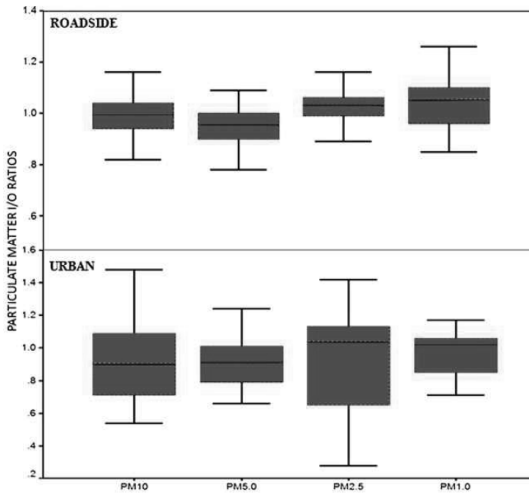


그림 10. 인도의 도로변 및 도시대기 지역 주택에서 다양한 입자크기별 실내의 농도비 분포 (Massey et al., 2012)

국내의 경우 Baek et al.(1997)이 1994-1995년 동

안 서울과 대구 지역의 주택, 사무실 및 식당의 실내공기질을 측정하여 오염물질별 실내외 농도 수준과 실내외 농도비를 구하여 보고한 바 있다. 이 중에서 주택의 연구결과를 표 1에 나타내었다. 이산화질소(NO<sub>2</sub>)를 제외하고 실내외 농도비가 1보다 큰 값을 알 수 있다. 양원호 등(2010)은 2010년 6-7월 동안 수동식 시료채취기(passive sampler)를 사용하여 주택 실내외, 실외 개인노출 NO<sub>2</sub> 농도를 측정하여 실내외 농도비와 개인노출에 대한 주택 실내외 기여도를 추정하여 제시하였다. 표 2는 7일 동안 측정한 실내, 실외 및 주부의 개인노출 NO<sub>2</sub> 농도의 통계값을 정리하여 나타낸 것이다. 최근 Lee et al.(2016)은 서울 소재 20개 주택을 대상으로 모델링을 통해 PM10과 PM2.5의 실내외 농도비를 기온과 아파트 층수의 상관식으로 제시한 바 있다. 그리하여 그림 11에 나타낸 바와 같이 이러한 상관식을 이용하여 추정한 실내외 농도비가 실제 측정값과 비교적 잘 일치한다고 보고하였다.

표 1. 주택에서 오염물질의 실내외 농도(단위 :  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; Baek et al., 1997)

Air quality parameter	Indoor				Outdoor				I/O ratio <sup>a</sup>	WRST <sup>b</sup> p
	Median	Mean	S.D.	Range	Median	Mean	S.D.	Range		
RSP	91	100	58	12-244	68	80	58	12-271	1.3	0.049 <sup>d</sup>
CO (ppm)	1.8	2.1	1.5	0.1-6.2	1.6	2.1	1.6	0.2-7.0	1.1	0.717
CO <sub>2</sub> (ppm)	685	790	494	369-3634	494	577	366	357-2881	1.4	< 0.001 <sup>d</sup>
NO <sub>2</sub> (ppb)	24	33	22	9-96	29	32	14	12-67	0.8	0.510
Benzene	7.9	8.2	7.9	0.1-27.2	6.9	9.4	10.9	0.1-47.2	1.1	0.823
Toluene	31.0	42.3	47.2	0.6-202.4	27.4	42.6	54.4	0.1-222.1	1.1	0.742
Ethylbenzene	4.0	5.1	4.1	0.6-17.0	3.9	5.1	5.0	0.1-23.1	1.0	0.753
m + p-Xylene	11.6	14.4	11.2	2.0-57.4	10.6	14.8	14.1	0.8-59.9	1.1	0.725
Styrene	3.7	3.9	1.8	0.6-8.3	3.3	3.9	2.9	0.3-15.6	1.1	0.448
o-Xylene	7.0	9.1	7.0	1.3-29.1	5.5	8.6	8.2	0.7-36.7	1.3	0.558
1,3,5-TMB <sup>c</sup>	3.1	4.1	4.6	0.3-25.0	2.5	4.4	8.8	0.1-59.4	1.2	0.281
1,2,4-TMB	6.8	9.5	11.7	1.0-71.4	5.8	9.9	17.9	0.1-108	1.2	0.225
Nicotine	0.6	1.8	2.5	0.3-9.5	0.3	0.3	0.1	0.3-0.7	2.0	< 0.001 <sup>d</sup>
UVP	13.2	19.5	23.1	3.3-146	6.4	9.5	8.1	1.6-42.0	2.1	< 0.001 <sup>d</sup>
FPM	6.0	9.3	11.9	0.6-77.9	3.4	4.2	3.8	0.1-15.7	1.8	< 0.001 <sup>d</sup>
SolPM	1.0	7.0	19.9	1.0-131	1.0	1.5	2.1	1.0-12.2	1.0	0.003 <sup>d</sup>

<sup>a</sup> Ratio of median concentrations indoors to outdoors.

<sup>b</sup> WRST p: Wilcoxon rank sum test significance.

<sup>c</sup> TMB: Trimethylbenzene.

<sup>d</sup> Indicates that indoor and outdoor groups are different at a significant level of 0.05 by the Wilcoxon rank sum test.

표 2. 주택에서 7일 동안 측정된 실내, 실외 및 주부의 개인노출 NO<sub>2</sub> 농도(양원호 등, 2010)

	AM±S.D.	Min	Max	GM(S.D.)
Indoor (n= 119)	25.75±9.68	4.24	49.04	23.62±1.56
Outdoor (n= 119)	30.77±11.99	5.30	60.42	28.16±1.57
Indoor/outdoor (n= 119)	0.87±0.22	0.42	1.61	N.A.
Personal (n= 119)	28.79±10.43	5.99	55.94	26.64±1.53

\* N.A. : Not Applicable.

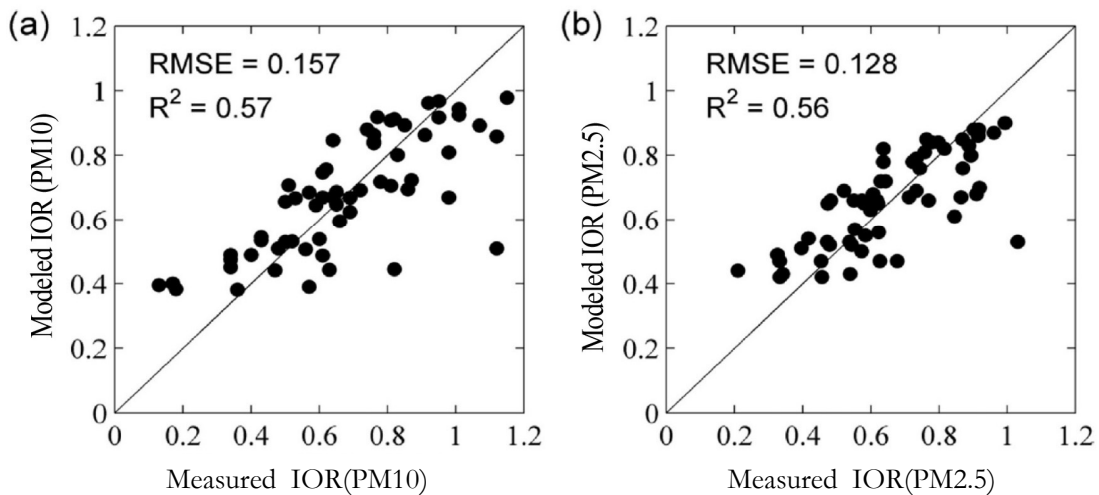


그림 11. PM10과 PM2.5 실내의 농도비의 측정값과 추정값의 비교(Lee et al., 2016)

#### 4. 주택 실내외 공기오염 사례

건물의 환기부족과 건축자재에서 방출된 화학물질의 공기오염에 의한 건물증후군(sick building syndrome)이 주택에서 새집증후군(sick house syndrome)으로 확산되어 건축자재에서 방출되는 휘발성 유기화합물과 폼알데하이드를 관리함으로써 실

내공기질이 많이 개선되고 있다. 이와 더불어 일상 생활에서 조리 시 발생하는 연소오염물질이 실내공간으로 확산되어 야기되는 실내공기오염과 주택에 인접한 도로에서 자동차 배기가스의 실내유입에 의한 실내공기오염도 매우 중요한 이슈이다(Buonanno et al., 2013).

Bekö et al.(2013)은 덴마크 코펜하겐의 56개 주택에서 초미세입자(ultrafine particle)의 개수농도를 측정하였는데, 그림 12는 주택에서 일어날 수 있는 다양한 연소활동 시 초미세입자 개수농도의 급격한 증가와 발생하는 입자 크기의 변화를 나타낸 것이다. 연소활동 시 평균 입경이 작아지는데, 이것은 연소 시 매우 작은 크기의 입자가 대량으로 발생되

기 때문이다.

국내에서도 김종범 등(2014)은 2014년 1월 고층 아파트의 거실과 발코니에서 48시간 동안 실내외 공기질을 연속적으로 측정하여 그림 13과 같이 조리 시 초미세입자가 고농도로 발생하여 실내공기질을 심하게 오염시키는 현상을 확인하였다.

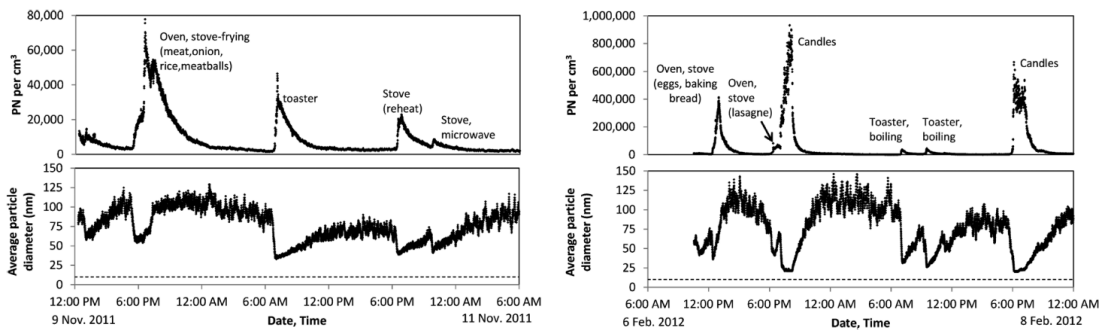


그림 12. 덴마크의 주택 2곳에서 연소활동 시 실내 초미세입자의 개수농도와 평균 입경의 변화 (Bekö et al., 2013)

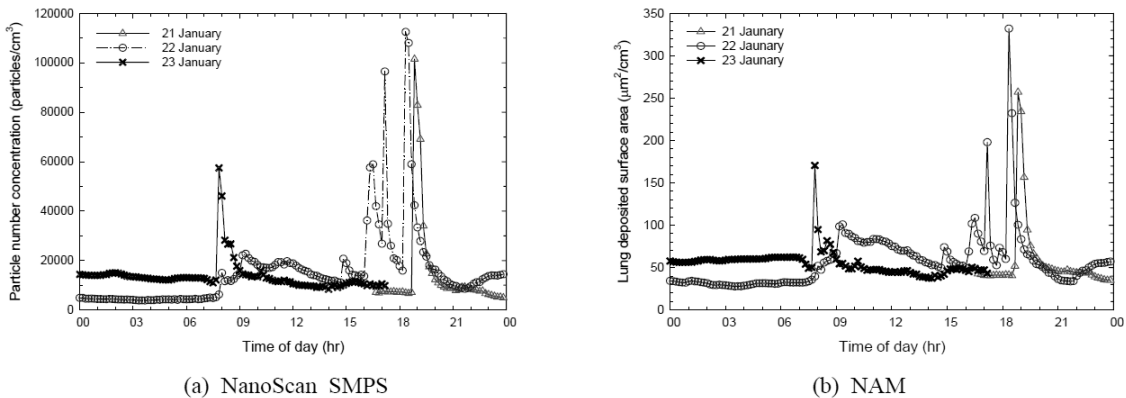


그림 13. 서울시 고층 아파트의 실내에서 조리 시 초미세입자 개수농도 및 표면적농도의 변화 (NanoScan SMPS : 개수농도, NAM : 폐 침착 표면적농도; 김종범 등, 2014)

대도시는 자동차가 많아 도로가 발달되어 있고, 현대인들은 교통이 편리한 곳을 선호하여 도로에 인접한 곳에 주택이 밀집되어 있다. 이로 인해 불가

피하게 도로를 달리는 자동차에서 배기되는 오염물질이 주위로 이동하면서 주택 실내로 침투하여 실내공기질을 악화시킬 수 있다. 그림 14는 배기담 등



(2007)이 2005년 3월 서울시 연세대 정문 앞 도로변에서 측정한 초미세입자 개수농도의 일변화를 1시간 평균으로 나타낸 것으로 자동차 통행량이 증가하는 출근시간대에 초미세입자 개수농도도 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 저녁 퇴근시간대에도 통행량 증가에 의해 농도가 다시 증가하는 것을 볼 수 있다. 김종범 등(2014)은 2014년 1월 고층 아파트의 거실과 발코니에서 48시간 동안 실내

외 공기질을 연속적으로 측정하여 그림 15와 같이 도로에서 발생된 질소산화물( $\text{NO}_x$ )이 실내로 침투하여 실내공기를 심하게 오염시키는 현상을 확인하였다. 실내  $\text{NO}_x$  농도가 실외  $\text{NO}_x$  농도의 일변화 경향을 거의 추종하는 것으로 보아 실내  $\text{NO}_x$ 가 외부에서 침투한 것으로 판단된다. 실내  $\text{NO}_2$  농도가 실외  $\text{NO}_2$  농도보다 높은 것은 실내로 침투한  $\text{NO}$ 가 산화반응에 의해  $\text{NO}_2$ 로 변환되었기 때문이다.

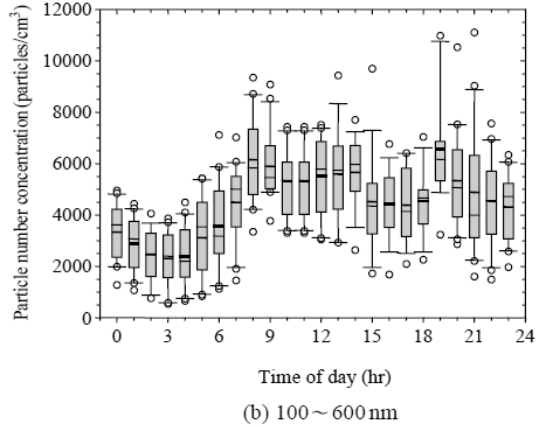
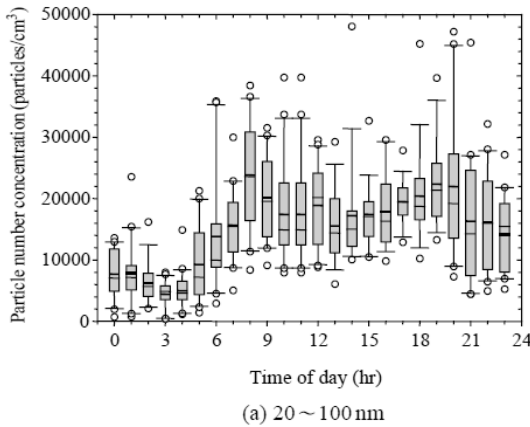
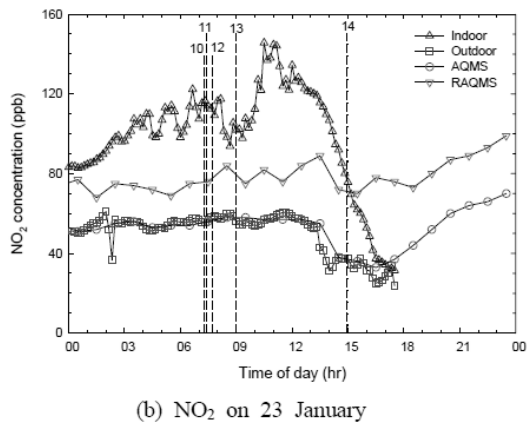
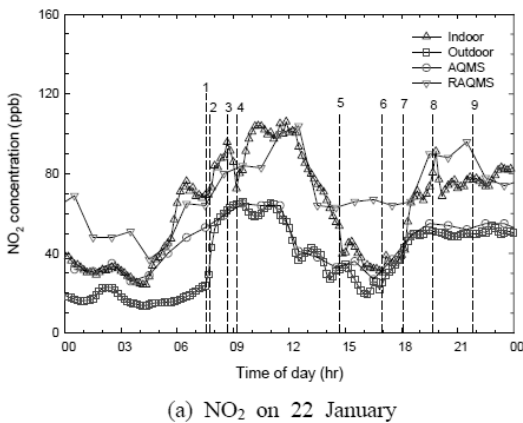
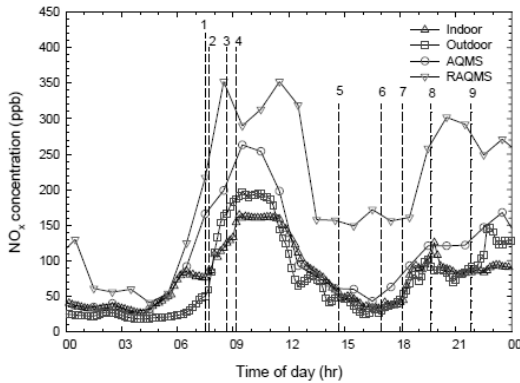
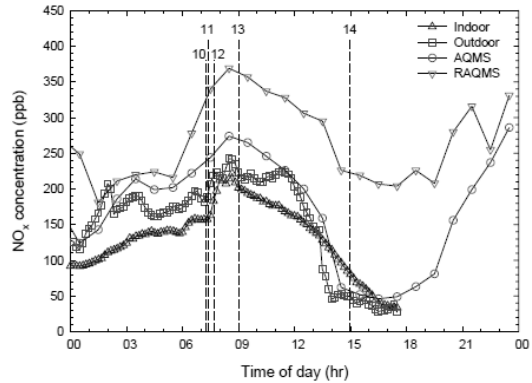


그림 14. 서울시 연세대 정문 앞 도로변에서 초미세입자 개수농도의 일변화 (배귀남 등, 2007)





(c) NO<sub>x</sub> on 22 January



(d) NO<sub>x</sub> on 23 January

그림 15. 서울시 고층 아파트 실내외 및 인접 국가 대기오염측정소에 측정된 NO<sub>2</sub> 및 NO<sub>x</sub> 농도의 일변화 비교 (Indoor : 실내 거실, Outdoor : 발코니, AQMS : 도시대기 측정소, RAQMS : 도로변 대기측정소, 김종범 등, 2014)

## 5. 결론

현대인들은 주택에서 60% 이상의 시간을 보내면서 생활하고 있으므로, 건강한 삶을 영위하기 위해서는 주택의 실내공기질 관리가 무엇보다 중요하다. 전통 가옥에서 아파트로 대표적인 주거공간의 형태가 변화되면서 주방이 거실과 분리되지 않는 구조로 바뀌어 조리 시 발생하는 연소오염물질을 잘 관리하는 것이 매우 중요함에도 불구하고 지금까지 소홀하게 다루어졌는데, 최근 주방오염에 대해 언론매체에서 빈번하게 보도하고 정부에서도 조리 시 주방오염의 관리방안을 마련하는 등 관심이 높아지고 있다.

그러나 주택에 인접한 도로에서 발생하는 자동차 배기가스가 실내로 유입되어 실내공기질을 악화시키는 문제는 아직 공론화되지 않고 있어 이에 대한 관심이 필요하다. 국민의 건강을 보호하기 위해서는 환기와 공기청정을 적절하게 복합적으로 사용하여 실제적인 실내공기질 개선을 도모해야 할 시기라고 생각된다.

## - 참고문헌 -

1. 김유미, 김진영, 이승복, 문길주, 배귀남 (2015) 최근 중국의 초미세먼지 오염 연구 동향, 한국 대기환경학회지, 31(5), 411-429.
2. 김종범, 이광재, 류성희, 이재영, 우성호, 이승복, 김경환, 윤성택, 배귀남 (2014) 겨울철 연소오염원에 의한 도심 고층 아파트의 실내공기오염, Particle and Aerosol Research, 10(3), 119-130.
3. 배귀남, 허선영, 이승복, 안민하, 박동호, 황정호 (2007) 봄철 서울 도로변의 초미세 입자 오염 특성, Particle and Aerosol Research, 3(1), 29-40.
4. 배귀남 (2014) 동북아시아 지역의 초미세먼지 오염 현황 (2014) 공기청정기술, 27(4), 1-15.
5. 양원호, 이기영, 박경화, 윤충식, 손부순, 전준민, 이현수, 최옥희, 유승도, 한진석 (2009) 한국인의 평일 및 주말의 국소환경 시간활동 양상, 한국실내환경학회지, 6(4), 267-274.

6. 양원호, 안호기, 이현수, 지엔페이, 우병렬 (2010) 전업주부의 이산화질소 노출에 대한 주택실내 공기질 기여도, 한국실내환경학회지, 7(3), 179-186.
7. Baek, S. O., Kim, Y. S., and Perry, R. (1997) Indoor air quality in homes, offices and restaurants in Korean urban areas - Indoor/outdoor relationships, Atmospheric Environment, 31(4), 529-544.
8. Bekö, G., Weschler, C. J., Wierzbicka, A., Karotki, D. G., Toftum, J., Loft, S., and Clausen, G. (2013) Ultrafine particles: Exposure and source apportionment in 56 Danish homes, Environmental Science & Technology, 47, 10240-10248.
9. Buonanno, G., Stabile, L., Morawska, L., and Russi, A. (2013) Children exposure assessment to ultrafine particles and black carbon: The role of transport and cooking activities, Atmospheric Environment, 79, 53-58.
10. Chen, C. and Zhao, B. (2011) Review of relationship between indoor and outdoor particles: I/O ratio, infiltration factor and penetration factor, Atmospheric Environment, 45, 275-288.
11. Godish, T. (2001) Indoor Environmental Quality, Lewis Publishers.
12. Klepeis, N. E., Nelson, W. C., Ott, W. R., Robinson, J. P., Tsang, A. M., Swtzer, P., Behar, J., Hern, S. C., and Engelmann, W. H. (2001) The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants, Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology, 11, 231-252.
13. Lee, J. Y., Ryu, S. H., Lee, G., and Bae, G. N. (2016) Indoor-to-outdoor particle concentration ratio model for human exposure analysis, Atmospheric Environment, 127, 100-106.
14. Massey, D., Kulshrestha, A., Masih, J., and Taneja, A. (2012) Seasonal trends of PM10, PM5.0, PM2.5 & PM1.0 in indoor and outdoor environments of residential homes located in North-Central India, Building and Environment, 47, 223-231.
15. Stranger, M., Potgieter-Vermaak, S. S., and Van Grieken, R. (2007) Comparative overview of indoor air quality in Antwerp, Belgium, Environment International, 33, 789-797.