

PFT법에 의한 수직적 3 ZONE 분할 조건에서의 환기량 측정

Ventilation Measurement with PFT in Three-storied Detached House

김 훈(Hoon Kim)[†]

국립보건의료과학원

Department of Healthy Building and Housing, National Institute of Public Health, Saitama 351-0197, Japan

(Received February 21, 2013; revision received July 5, 2013)

Abstract The PFT (PerFluorocarbon Tracergas Technique) is of advantage to field surveys for evaluating the ventilation condition, due to its simplicity and convenience. On the other hand, it requires researchers to make some additional considerations that include uncertainties, such as the substance concentration distribution in indoor air, representativeness of a sampler, deviation of emission sources, and analysis error. In this study, the PFT and CO₂ tracer gas methods were applied simultaneously, to evaluate the accuracy of PFT on six ventilation conditions in the three-storied detached house. The air exchange and the outdoor air introduction a between and into zones were measured. As the results, deviations of PFT concentration distributions were observed at a sufficiently low level for an accurate determination for a house where the interior height was large, and there were relatively many partition walls. However, when a uniform airflow appeared in the indoor air, it was also validated that the indoor air would be exhausted without sufficient mixing, and consequently the measurement error of the PFT would be large.

Key words PFT(PFT), Ventilation(환기), Air exchange(공기 교환), Tracer gas(추적 가스), Multi zone(복수 존), Uncertainty(불확실성)

[†] Corresponding author, E-mail: kimhoon@niph.go.jp

1. 서 론

환기부족은 공기 환경 악화, 불쾌감과 같은 건강 위생면의 피해를 일으킨다. 한편, 과환기(過換氣)는 온열 환경의 질적 저하, 기류에 의한 불쾌감, 에너지 소비 증가의 원인이 된다. 1970년대의 오일 쇼크 이후, 에너지 절약의 중요성에서 과급된 주택의 고기밀화(高氣密化)에 따른 환기량 감소와 새로운 건축 소재 사용량의 증가, 생활 패턴의 변화 등으로부터 새집증후군이라 불리는 증상이 사회 문제화 되었다. 이로 인해 국내에서는 다중 이용 시설 등의 실내 공기질 관리법(2007년)이 시행되었으며, 이후 최소 필요 환기량 기준 0.7 회/h가 제안되었다.

한편, 에너지 가격 상승과 에너지 수급(需給) 문제로 인하여 에너지 절약에 대한 요구는 날로 증가하고 있으며, 에너지 절약과 건강 위생을 모두 만족시킬 수 있는 균형 있는 환기의 중요성 또한 한층 더 높아지고 있다.

주택에서의 환기량 실태를 파악하기 위한 환기량 측정에는 풍량 측정법, 추적 가스(Tracer gas)법, 차압 측정 및 유량 계수를 이용한 추정법 등이 이용된다.⁽¹⁻³⁾

이 중에서도 측정 정밀도의 우수성으로부터 추적 가스법이 자주 이용되고 있으나, 가스 발생 장치, 제어 장치, 분석 장치 등으로 구성되는 기계 장치가 필요하며, 현장에서의 방출(Dosing) 및 채취(Sampling; 샘플링)용 튜브의 설치도 실측의 부담 요인이 된다.

실제 주택에서의 환기 성능 검증을 위해서는 보다 간편하고 소음이 없으며, 정밀도를 확보하며 비용이 적게 드는 측정법이 바람직하다. 이에, 1980년대부터 구미(歐美)를 중심으로 한 PFT법(PerFluorocarbon Tracergas Technique)⁽⁴⁻⁸⁾이라 불리는 측정법이 개발, 연구되어 왔다. PFT법의 추적 가스로 사용되는 물질인 불화탄소류(Perfluorocarbons; PFCs)는 그 종류가 다양하며 PFCs 물질의 조합이나 샘플링 수법 또한 연구자에 따라 다양하다.

2. 연구 배경 및 목적

PFT법은 방출과 샘플링에 패시브(Passive) 수법⁽⁹⁻¹⁰⁾을 이용하는 방법으로, 시간당 물질 샘플링량이 적기 때문에 일반적으로는 장기간의 측정을 필요로 한다.

단시간 변화를 파악하기 힘든 특성 때문에 환기량 변동(물질 농도 변화)이나 공간내 농도 분포에 의한 불확실성이 증가한다. 이로 인하여 환기량이 많고, 공간내에 일정 방향의 기류가 발생하여 혼합 효율이 현저히 저하되는 경우에는 측정 정밀도가 나빠지는 점이 단점으로 지적되어 왔다.⁽¹⁰⁾

본 연구 그룹은 보다 간편하고 사용하기 쉬운 PFT법을 개발하기 위하여 추적 가스 방출 방식, 샘플러 종류, 분석법에서 기존의 PFT법과는 다른 방식의 측정법을 제안하여 실험을 통한 정밀도 향상을 도모함과 동시에, 실제 주택을 대상으로 한 환기량 측정을 실시하여 왔다.⁽¹¹⁻¹⁷⁾

특히, 본 PFT법의 최대 특징은 패시브 샘플러의 샘플링 시간을 수 시간에서 24시간으로 하는 짧은 기간의 측정이 가능하도록 한 것으로, 1일 이내의 실내의 환기 상태와 유해 물질의 인체 노출 농도를 산정할 수 있다. 측정법과 함께 PFCs 3물질에 대한 샘플링 레이트(Sampling rate; 상당 흡인 속도)를 공개하고 있는 것도 특징이라 할 수 있다.⁽¹⁶⁾

하지만, 가스 모니터를 이용한 측정법처럼 매우 짧은 시간 간격에서의 농도 측정은 곤란하다. 그 때문에, 외란(外亂) 변동이 심한 경우, 국소 환기 성상에 분포가 있는 경우에는 혼합이 충분히 이루어지지 않아 농도 분포가 생긴 상태에서 샘플러에 채취되어 측정 오차가 커질 가능성도 보고되어 있다.⁽¹⁸⁾ 또한, 주택 내부는 칸막이벽에 의해 구획, 분할된다. 각 실을 다른 zone으로 설정하여 실시한 PFT법에 의한 환기량 측정은 다수 보고되어 왔으나, 본 연구에서처럼 3층 주택의 각 층을 하나의 zone으로 설정하는 경우, 상하층간 공기 유동에

더불어 동일 zone 내의 칸막이벽에 의하여 물질의 공간 농도 분포가 커질 가능성이 있다.

이에, 불확정 요소가 많은 현장 실측에 대한 PFT측정법의 성능 검증을 위하여, 본 연구에서는 3층 단독주택을 입면적으로 3 zone으로 분할하여 PFT 및 CO₂ 추적 가스법에 의한 비교 측정을 하였다. 측정 대상 주택은 2종류의 덕트식 제3종 중앙 환기 설비가 설치된 3층 단독 주택형 실험동이며, 환기 조건을 변경하여 측정을 실시하였다. 더불어, PFT법에 의한 zone간 공기 교환 양상을 해석하여 PFT법의 복수 zone에 대한 적용 유효성을 제시하며, 공간 내 농도 분포 및 샘플러의 공간 대표성에 대하여 조사하였다.

3. 측정 대상 주택 및 환기 조건

3.1 주택 개요

측정 대상 주택 평면도, 측정점 및 개요를 Fig. 1에, 두 환기 시스템의 개요도를 Fig. 2에 나타낸다.

측정 대상은 A사의 주택 성능 시험장내에 건설된 3층 단독 주택으로, 성능 시험을 위하여 M사 및 G사의 덕트식 제3종 중앙 환기 시스템이 도입되어 있으며, 두 시스템 모두 최소 필요 환기량 0.5 회/h 이상을 만족하도록 설계되었다. M사 시스템은 1, 2층에는 화장실에 개별 배기팬, 3층에 덕트식 중앙 환기 시스템이 설치되어 있으며, G사 시스템은 1층을 담당하는 환기 시스템이 1층에 1대, 2층과 3층을 담당하는 시스템이 3층에 1대 설치되어 있는 덕트식 환기 시스템이다. 급기구는 거주용 실에 1개씩 설치하는 것을 원칙으로 하

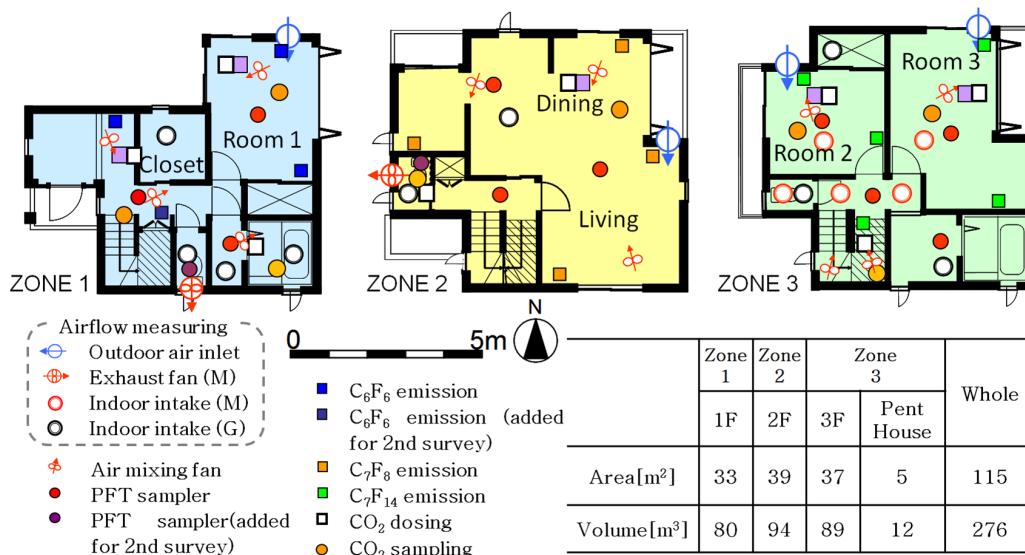


Fig. 1 House plan and outline with measuring points.

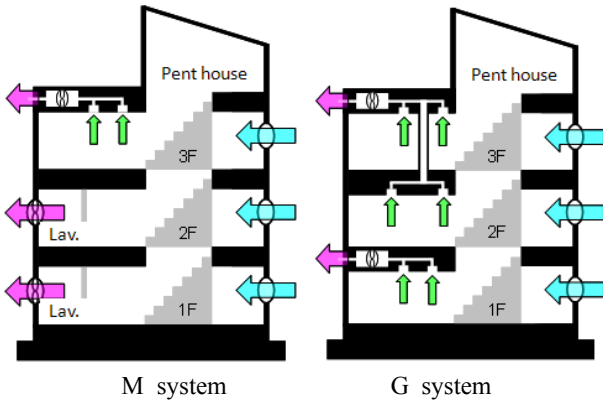


Fig. 2 Ventilation Scheme of the systems.

Table 1 Ventilation conditions

	Ventilation condition	1F	2F	3F
Con.1	M system (Central exhaust on)	○	○	○
Con.2	M system (Central exhaust off)	○	○	×
Con.3	G system (Central exhaust on)	○		○
Con.4	Natural ventilation	×	×	×

여, 1층에 1개, 2층 1개, 3층에 2개가 설치되어 있다. 각 층을 하나의 zone으로 하여 세 개의 zone으로 설정하였으며(Fig. 1), PFT 및 CO₂를 이용한 추적 가스법과 풍량 측정법에 의한 측정을 행하였다.

3.2 환기 조건

실측 조건은 Table 1, 실측 항목은 Table 2와 같다.

Table 2 Details and instruments of measurement

		Measuring instrument	
Ventilation rate Air exchange	PFT	Tracer gas	C6F6, C7F8, C7F14
		Emission source	Vial(2ml)/Silicone film
		Sampler	Passive gas tube(SIBATA)
		Emission rate	Electric balance(AandD GR-300)
Ventilation rate	CO ₂ (Primary survey)	Tracer gas	CO ₂
		Gas monitor	CO ₂ gas monitor (Kona Sapporo SK-001)
		Air mixing	Circulating fans(eleven)
Airflow rate		Airflow meter(Kona Sapporo KNS-300)	
Climate(Wind)		Weather station(Vantage pro2 by Davis)	
Temperature/Humidity		Thermo recorder(TABAI ESPEC RS-11)	

실측은 하계(1차 실측)와 추계(2차 실측)에 걸쳐 실시하였으며, 1차 실측에서는 [조건 1 : M사 제3층 중앙 환기, 조건 2 : M사 제3층 중앙 환기 시스템 정지 -1층/2층 화장실 배기팬만 가동, 조건 3 : G사 제3층 중앙 환기, 조건 4 : 자연 환기]의 4가지 환기 조건을 설정하였으며, 2차 실측에서는 [조건 1, 조건 3]의 2가지 조건만을 재적용하였다. 측정 기간 중은 에어컨을 24°C로 설정하여 상시 가동하였다.

4. 측정법

1차 실측은 PFT법의 정밀도 검증을 목적으로 하여, 전관(全館) 기계 환기 2조건(조건 1, 조건 3), 화장실 배기팬만 작동시킨 1조건(조건 2), 자연환기 1조건(조건 4)을 설정하여, PFT 일정 발생법, CO₂ 일정 농도법, 풍량 측정법을 이용하였다.

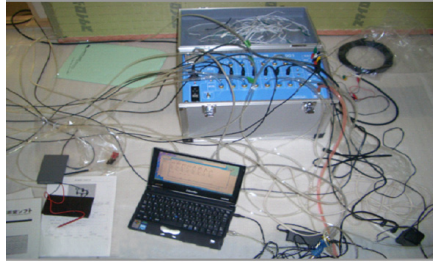
2차 측정에서는 전관 기계 환기 2조건에 대하여 PFT 일정 발생법과 풍량 측정법에 의한 측정을 실시하였다. 2차 측정의 주안점은 PFT의 공기 중 농도 저감과 농도 분포 특성 파악이다. 각 측정법의 상세에 관해서는 이하에 설명하였다. 또한, PFT 방출량 및 샘플링 레이트는 온도 의존성이 있으므로, 방출원 및 샘플러 주변의 온습도를 메모리식 온습도계(TABAI ESPEC RS-11)로 측정하였다.

4.1 풍량 측정법

풍량 측정기 및 CO₂ 가스 모니터를 Fig. 3에 나타낸다. 내부 밀폐에 의한 압력 부하를 피하기 위하여 실내 도어를 모두 개방하며, M사 제3층 환기 시스템, G사 제3층 환기 시스템에 대하여 각 환기구에서의 풍량을 계측하였다.



(a) Airflow meter



(b) CO₂ gas monitor

Fig. 3 Instruments.

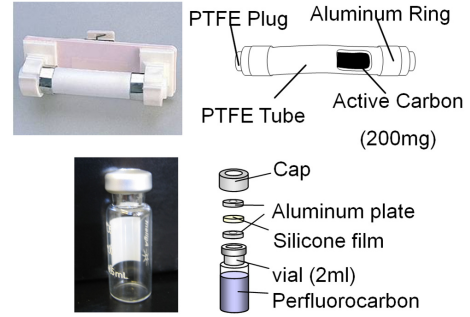


Fig. 4 Passive sampler and emission source for PFT.

물질의 방출량 및 공기 중 농도로부터 외기 도입량 산출은 식(1) 및 식(2)에 의한다.

$$C = \frac{M_a - M_b}{k \times t} \quad (1)$$

$$\bar{Q} = \frac{\bar{m}}{C} \quad (2)$$

4.2 CO₂ 일정 농도법

CO₂법은 1차 실측에만 적용하였다. 다수실 환기 측정기(비분산 적외선 분석법, SK-001, Kona Sapporo社)를 사용하여, 목표 농도를 2000 ppm으로 설정하였다. 다점(多點)에서의 CO₂ 농도를 측정할 수 있으므로, 본 실측에서는 복수의 도저(Doser)와 샘플러를 설치하여 측정을 실시하였다.

1채널당 방출 및 샘플링의 소요 시간은 2분이며, 실내 8채널+외기 1채널+휴지(休止) 2분으로 측정 주기는 20분이다.

4.3 PFT 일정 발생법

PFT 방출원 및 샘플러의 개요도를 Fig. 4에 나타낸다. 바이얼에 든 PFCs 용액의 증기가 실리콘 막을 통해 일정 속도로 방출된다. 주택을 복수(複數) zone으로 설정하여 각각 다른 종류의 PFCs 물질을 방출시킴으로써 복수 zone에서의 공기 교환량 및 외기 도입량(환기량)의 산정이 가능해 진다. 동일 zone에서는 동일 물질을 방출시킨다. 본 연구의 PFT법에서는 C₆F₆, C₇F₈, C₇F₁₄의 3가지 물질을 사용하며, zone은 최대 3개까지 설정할 수 있다. PFT 방출원은 공기중 농도가 가능한 정상 상태에 가까워지도록 샘플링 개시 시간으로부터 수 시간에서 1일 전에 미리 설치하여 둔다.

PFT법은 방출과 샘플링 모두 패시브법을 이용하기 때문에, 산출할 수 있는 것은 측정 기간 전체에 대한 평균 환기량이 된다.

- C : 물질 농도 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
- \bar{C} : 측정 기간 중 물질의 평균 농도 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
- k : 샘플링 레이트(상당 흡인 속도) [ml/min]
- \bar{m} : 측정 기간 중 평균 방출량 [$\mu\text{g}/\text{h}$]
- M_a : 측정용 샘플러의 총채취량 [μg]
- M_b : 트래블 블랭크용 샘플러의 분석량 [μg]
- \bar{Q} : 측정 기간 중 평균 환기량 [m^3/h]
- t : 샘플링 시간 [min]

복수 물질을 이용한 복수 zone에서의 공기 교환량 및 외기 도입량은 연립 방정식을 기본으로 하나, 확정적 수법에 의한 단순 해법으로는 부(負)의 환기량이 나타나는 등 적합한 해가 얻어지지 않는 경우가 발생하므로, 최소 이승법을 이용하여 잔차(殘差)가 최소가 되는 해를 추정한다.⁽¹⁹⁾

PFT 방출원은 실리콘 막을 방출막으로 사용하며 2 ml 용량의 바이얼에 액체 PFCs를 충전하였다. 방출막으로 1 mm 두께의 실리콘 막을 사용하였으나, C₆F₆ 및 C₇F₈는 방출량이 많아 각각 직경 2 mm, 3 mm로 천공한 알루미늄 판을 실리콘 막 상부에 끼워 방출량을 저감시켰다. 하지만, 1차 실측 결과로부터 C₆F₆는 공기중 농도가 높고(방출량이 많고), C₇F₈ 및 C₇F₁₄는 낮게 측정되어, 2차 실측에서는 방출원 1개당의 방출량과 방출원의 개수를 조정하였다. 이에, 2차 실측에서는 C₆F₆에 5 mm두께의 실리콘 막을 사용하고, C₇F₈ 및 C₇F₁₄에는 1 mm두께의 실리콘 막만을 사용하였다. 각 zone에서의 평균 물질 방출량은 C₆F₆, C₇F₈, C₇F₁₄순으로 1차 실측에서 14.9 mg/h, 4.5 mg/h, 7.3 mg/h, 2차 실측에

Table 3 Airflow rate [m³/h] (air change rate [h⁻¹])

		Con.1 (M system)		Con.3 (G system)	
		Measured	Designed	Measured	Designed
1st	Zone1	29(0.36)	38(0.48)	64(0.80)	60(0.75)
	Zone2	32(0.34)	38(0.40)	39 (0.55)	100(0.51)
	Zone3	95(0.94)	100(0.99)	69	
	Whole	154(0.56)	174(0.64)	172(0.62)	160(0.58)
2nd	Zone1	31(0.39)	38(0.48)	46(0.58)	60(0.75)
	Zone2	37(0.39)	38(0.40)	36 (0.52)	100(0.51)
	Zone3	100(0.99)	100(0.99)	65	
	Whole	168(0.64)	174(0.64)	147(0.53)	160(0.58)

* h⁻¹ = ACH.

* 1st : Primary survey, 2nd : Secondary survey.

서 8.7 mg/h, 6.5 mg/h, 5.3 mg/h이었다. PFT의 공간내 혼합 효율을 높이기 위하여 방출원은 급기구 부근에 설치하며, 교반(攪拌) 팬을 이용하여 실내 공기를 교반하였다. 채취용 샘플러는, 1차 실측에서는 각 조건당 10개소에 설치하였으며, 2차 실측에서는 화장실 및 펜트 하우스에 1개씩을 추가하여 각 조건당 13개소에 설치하였다.

PFT를 채취하는 패시브 샘플러로는 패시브 가스 튜브(SIBATA社)를 사용하였다. 샘플러는 회수 후, 용매 추출(溶媒抽出) 및 GC/MS에 의해 정성정량(定性定量)하였다. 샘플링 레이트는 25°C, 50%RH 기준 조건하에서 C6F6 : 42.0 ml/min, C7F8 : 44.2 ml/min, C7F14 : 36.0 ml/min이다.

5. 1차 측정 결과

외기 조건은 조건 1에서 26.2~33.1°C(평균 26.5°C, 69%RH), 조건 2; 26.0~32.8°C(평균 29.0°C, 75%RH), 조건 3; 23.6~29.2°C(평균 26.0°C, 72%RH), 조건 4; 24.6~30.4°C(평균 26.6°C, 72%RH)였다. 에어컨 상시 운전으로 실내 온도의 일변동은 적었으며, 펜트하우스를 제외한 모든 측정 포인트에서 24°C 전후가 되었다. 펜트하우스는 모든 조건에서 평균 온도가 3층 측정점의 평균 온도를 1.5~3.0°C 상회하였다.

5.1 풍량 측정 결과

풍량 측정 결과 및 설계 풍량을 Table 3에 정리하였다. M사 환기 시스템에 있어, 모든 zone에서 실측치가 설계치를 약간 하회하였으며, 주택 전체에 대한 배기 풍량은 설계치를 11% 하회하였다. G사 환기 시스템에 있어, Zone1에서는 실측 배기량 합계치는 설계 배기량

에 가까운 값을 보였다. 주택 전체에서의 설계 풍량은 M사 시스이 G사 시스템보다 10%정도 크지만, 실측 결과에서는 G사 시스템이 M사 시스템에 비해 약 12% 많은 결과를 보였다.

그러나, 설계치에 대해서는 M사 -11%, G사 +8%로 양 시스템 모두 설계치에 가까운 성능을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

5.2 CO₂ 환기량 측정 결과

CO₂법을 이용하여 측정된 시간에 따른 외기 도입량 변화를 Fig. 5에, 외기 도입량 및 환기 회수를 PFT법 결과와 함께 정리하여 Table 4에 나타내었다.

각 zone에 대한 개별 환기량을 참고치로써 표에 제시하였으나, 단일 가스를 이용한 측정에서 각 zone에 대한 개별 환기량을 산정하기 위해서는 응답법을 이용한 추정법과 같은 특수한 해법을 적용하여야 하므로, 본 연구에서는 주택 전체에 대한 환기량만을 검토 대상으로 한다.

모든 조건에서, 각 측정점에서의 CO₂농도는 타겟 농도 2000 ppm 전후에서 일정하게 유지되었다. 조건 1 및 조건 3에 있어서 1층 욕실 농도가 2500 ppm 전후로 비교적 높았으나, 이는 아직 욕실 전용 배기 설비가 도입되어 있지 않은 상태였기 때문으로 생각되어진다.

측정 기간 중의 평균 외기 도입량은 조건 1 : 0.41 회/h, 조건 2 : 0.22 회/h, 조건 3 : 0.39 회/h, 조건 4 : 0.11 회/h였다.

5.3 PFT 환기량 측정 결과

PFT법에 의한 외기 도입량 및 환기 회수를 Table 4에 정리하였으며, 각 zone간 공기 교환량을 Fig. 6에 도시하였다. 어느 조건에 있어서도 각 zone의 채취점에서의 PFT 농도는 비교적 동등한 결과를 보여 실내 공간에서 대체로 균일한 농도 분포를 보이고 있었으며, 여기에 관해서는 “7. 고찰”에서 논한다.

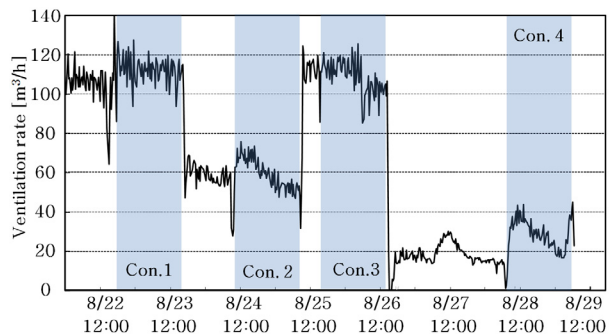


Fig. 5 Ventilation rates by CO₂ method.

5.3.1 조건 1(M사 제3종 중앙 환기)

Zone1과 Zone3에서 비슷한 양의 외기 도입이 이루어졌으나, Zone2에서는 외기 도입이 거의 이루어지지 않았다. 중앙 환기 시스템이 3층에만 설치되어 있어, 도입 외기의 대부분이 Zone3을 통해 배기되는 양상을 보였다. Zone3의 외기 도입량이 큰 것 또한, 환기 시스템의 흡인력(배기력)에 더불어 Zone3에는 급기구가 2개소에 설치되어 있는 것이 원인으로 생각되었다.

Zone1과 Zone2에는 화장실에 배기 팬이 설치되어 있지만, 배기량이 0에 가까워 3층의 중앙 환기 시스템

에 의한 배기력이 주택 내의 압력을 지배하고 있는 것으로 추찰되었다.

5.3.2 조건 2(M사 중앙 환기 정지-1층/2층 화장실 배기팬만 작동)

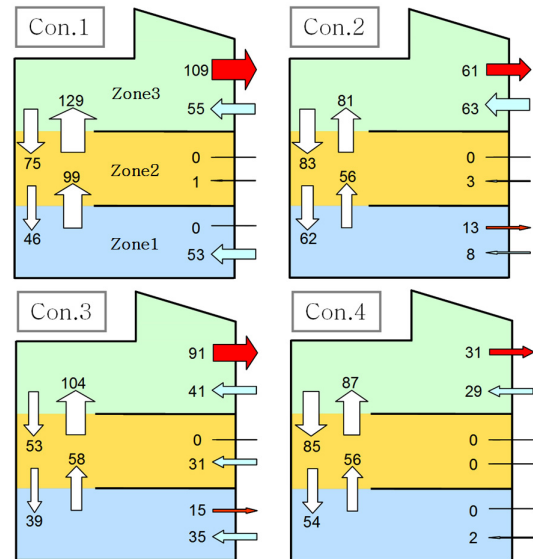
3층에 설치된 M사 중앙 환기 시스템을 정지시키고, 1층 및 2층 화장실의 배기팬만을 작동시킨 부분 환기 조건으로, 조건 1에 비하여 전체 외기도입량 및 배기량이 대폭 감소하였으나, Zone1에서의 배기량 비율은 증가하였다.

Zone1에서의 외기 도입량은 적어져 대부분의 외기 도입은 Zone3을 통해 이루어지고 있었다. 상하층 간의 공기 교환이 증가하였으며, Zone1을 통하여 약간의 배기가 이루어지지만 Zone2에서는 배기되지 않고 상부층으로 흘러 들어가 Zone3에서 배기되는 양상을 보였다. 하계의 외기 특성상 실내 온도가 외부 온도보다 현저하게 낮은 경우(냉방시)의 자연 환기 조건에서는 실내

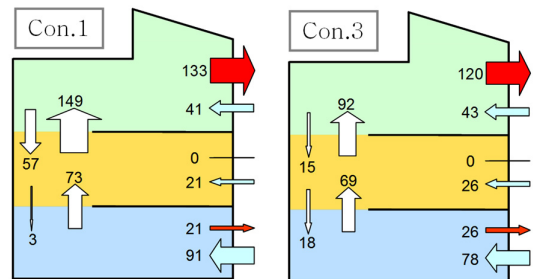
Table 4 Ventilation rates [m^3/h] (air change rate [h^{-1}]) by tracer gas methods

		Zone	Primary	Secondary
Con.1	PFT	Zone1	53(0.65)	91(1.10)
		Zone2	1(0.02)	21(0.30)
		Zone3	55(0.54)	41(0.44)
		Whole	109(0.39)	153(0.58)
	CO ₂	Zone1	49(0.70)	
		Zone2	10(0.16)	
		Zone3	54(0.53)	
		Whole	113(0.41)	
Con.2	PFT	Zone1	8(0.09)	
		Zone2	3(0.03)	
		Zone3	63(0.62)	
		Whole	74(0.27)	
	CO ₂	Zone1	13(0.19)	
		Zone2	3(0.05)	
		Zone3	44(0.43)	
		Whole	60(0.22)	
Con.3	PFT	Zone1	35(0.43)	78(0.92)
		Zone2	31(0.33)	26(0.28)
		Zone3	41(0.40)	43(0.42)
		Whole	106(0.39)	147(0.53)
	CO ₂	Zone1	52(0.71)	
		Zone2	15(0.27)	
		Zone3	42(0.41)	
		Whole	109(0.39)	
Con.4	PFT	Zone1	2(0.03)	
		Zone2	0(0.00)	
		Zone3	29(0.29)	
		Whole	31(0.11)	
	CO ₂	Zone1	5(0.07)	
		Zone2	2(0.03)	
		Zone3	22(0.22)	
		Whole	29(0.11)	

Note : Though ventilation rates at each zone by CO₂ method were shown above, they are not meaningful values due to the limitation of the method and only the values for the whole house volume are valid.



(a) Primary survey(summer)



(b) Secondary survey(autumn)

Fig. 6 Air exchange between zones by PFT method.

공기의 일부가 주택 하층부로 유출되는 현상을 추정할 수 있다. 이로 인한 2층부에서의 배기 압력 저하로 인하여 Zone2의 배기 성능을 저해하였을 가능성을 생각할 수 있다. Zone3에서의 배기는 실내 상하층간 온도차에 의한 공기 유동이, 정지된 환기 시스템의 덕트를 통해 이루어지고 있음을 의미한다.

5.3.3 조건 3(G사 제3종 중앙 환기)

모든 zone에서 균형 있는 외기 도입이 확인되었으며, 배기의 대부분은 Zone3에서, 나머지는 Zone1에서 이루어지고 있어 환기 설계와 유사한 결과를 보였다. 또한, Zone3과 하부층과의 공기 교환량 및 Zone3에서의 배기량이 조건 1에 비하여 감소하였다. 조건 3에 있어서도, Zone1에 설치되어 있는 환기 시스템의 배기 성능은 충분히 발휘되지 못하였으며, 대부분의 배기가 3층 환기 시스템에 의한 것이었지만, 각 층에서의 외기 도입은 밸런스 좋게 이루어지고 있었다.

5.3.4 조건 4(자연 환기)

주택 전체의 외기 도입량 및 Zone3에서의 외기 도입량·배기량은 현저하게 줄어들었다. 또한, Zone1, Zone2에서의 실내외 공기 교환은 거의 이루어지고 있지 않았다. 때문에, Zone3에서 도입된 외기는 아래층인 Zone2, Zone1을 순환하여, Zone3에서 배기되었다. 자연 환기 조건에서는 주택 전체에 대한 환기 회수가 0.11 회/h로 최소 환기량에 비해 현저하게 적은 양밖에 확보되지 못하였다.

6. 2차 실측 결과

추계 기간으로 외기온은 19~25°C 사이로 일변동은 적었으며, 실내는 에어컨의 상시 작동으로 인해 어느 측정점에 있어서도 21~25°C 범위에서 변동하였다. 외기 온도는, 조건 1에서 19.2~25.2°C(평균 21.2°C, 88%RH), 조건 3에서 19.8~24.7°C(평균 22.0°C, 80%RH)로, 각 조건에서의 평균치는 실온을 1.0~1.5°C 밀돌았다. 1차 실측에서는, 펜트하우스의 평균 온도가 다른 측정점의 평균 온도를 큰 폭으로 웃돌았으나, 2차 실측에서는 큰 차이는 보이지 않았다.

6.1 풍량 측정 결과

M사 환기 시스템은 1차 측정과 비교하여 약 9% 풍량이 증가하였으며, 설계치에 대해서는 -3%로 유사한 값을 보였다. 반면, G사 환기 시스템은 Zone1, Zone2, Zone3 모두 1차 실측보다 줄어든 결과를 보여 주택 전체에 대해서 15% 감소하였으나 설계치에 대해서는 -8%로 큰 차이는 보이지 않았다.

6.2 PFT 환기량 측정 결과

1차 실측에 비하여 조건 1에서 29%, 조건 3에서 28%가 증가하여, 주택 전체에서의 외기 도입량은 두 조건 모두 설계치에 가까운 값을 보였다. 특히, Zone3에서의 외기 도입량이 줄어든 반면 Zone1에서의 외기 도입량이 현저하게 증가한 것으로 나타나, 기계 환기 조건에서도 계절 변화에 의한 외기 온도 및 풍환경의 영향이 큰 것을 확인하였다. Zone3의 배기량은 조건 1에서 133 m³/h, 조건 3에서 120 m³/h로, 두 조건 모두에서 설계 배기량보다 높은 값을 보였다.

1차 실측과는 달리, 양 조건에서 외기 도입량은 Zone1이 가장 많았으며, 다음이 Zone3으로, Zone2는 가장 적었다. 배기량은 Zone3이 전체 배기량의 80% 이상(조건 1 : 86%, 조건 2 : 82%)을 차지하였으며, Zone2로부터는 거의 배기되지 않고 있었다.

조건 1과 조건 3 모두 Zone2에서 방출시킨 C7F8는 Zone1에서는 거의 검출되지 않았으며, Zone3에서 방출시킨 C7F14은 Zone1, Zone2에서 소량만이 검출되었다. 2차 실측에서는 상하층간의 공기 교환은 적으며, 하층부에서 도입된 외기는 상층부로 유입되어 Zone3에서 배기되고 있었다.

7. 고 찰

본 연구의 CO₂법 및 PFT법에 의한 환기량 비교 측정(1차 실측)에서, 전관 기계 환기 조건인 조건 1 및 조건 3의 주택 전체에 대한 환기 회수는 약 0.4 회/h였으며, 조건 2의 부분 환기 조건은 약 0.2 회/h, 그리고 조건 4 자연 환기 조건에서는 약 0.1 회/h로, 추적 가스법간의 측정에서는 비슷한 결과치를 보여 전체 환기량에 대한 PFT법의 측정 정밀도는 문제가 없는 것으로 판단되었다.

배기 풍량은 설계치에 대해 -11%~+8% 범위 내에서 측정되어 기후 조건에 따라 약간의 변동을 보였으나 그 차이는 크지 않았으며 환기 시스템의 풍량은 설계치에 유사한 성능을 가지고 있는 것을 확인할 수 있었다.

풍량 측정은 단시간(短時間) 측정으로 외란에 의한 변동이 발생하기 쉬운 점과 실내에서의 쇼트 서킷, 주택 기밀 성능에 의해 추적 가스법과의 차이가 발생할 가능성이 있다. 1차 실측에서는, CO₂법에 대하여 조건 1에서 36%, 조건 2에서 58% 큰 값을 보였으며, PFT법 결과보다 조건 1에서 41%, 조건 3에서 58% 큰 값을 보였다. 2차 실측에서는 PFT법에 대하여 10%, 0%로 거의 동등한 결과가 얻어졌다. 1차 실측과 2차 실측에 있어, 풍량 측정에서는 큰 차이가 나타나지 않았으나, 추적 가스법에 의한 환기량 평가에서는 2차 실측이 30%정도 환기량이 증가한 것으로 나타나, 계절 변동과 그로 인한 온도·풍환경의 변화가 주택의 실제 환

기량에 영향을 미친 것으로 생각된다.

PFT법을 적용함에 있어서 가능한 적은 수의 샘플러로 측정을 하는 것이 분석과 인력의 수고를 줄일 수 있는 합리적인 방법이다. 이번 실측 대상 주택은 각 층의 면적이 40 m²이하로 협소하며, 한 층에서의 칸막이벽 설치 밀도가 높은 편으로 공기 혼합 효율이 낮을 것으로 예상되어, 한 층에 3~5개의 샘플러를 설치하여 농도 분포를 조사하였으며, 농도 평균치 및 분포의 표준 편차, 상대 표준 편차(RSD%)를 Table 5에 정리하였다. 각 zone의 측정점에서의 PFT 농도는 1차 실측에서는 대체로 균일하였으나, 2차 실측에서의 공간 농도 분포는 편차가 크게 나타났다.

이번 실측에서 얻어진 농도 분포에서 화장실과 같은 협소한 공간은 각 zone 평균치보다 17~28% 낮은 농도를 보였으나, 각 zone에서의 전체 농도 분포는 1차 실측 RSD 5.5~7.3%, 2차 실측 RSD 15.9~17.7%의 편차를 보였다. 1차 실측과 같이 각 zone간의 공기 교환이나 혼합이 양호하게 이루어지는 경우에는 실(室) 중앙점을 채취 대표점(샘플러 설치 지점)으로 선정하여도 문제없는 것으로 판단되었으나, 2차 실측과 같이 하부층에서 유입된 공기가 상부층으로 유입되면서 순환하지 않고(공기 교환이나 혼합이 양호하게 이루어지지 않고) 그대로 배출되는, 일정한 기류 흐름이 발생하는

경우에는 공간 농도에 편차가 커지는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 이번 실측에서는 교반 팬을 설치하여 주택 내부의 공기 혼합 효율을 높이는 대책을 취하였으므로 혼합 장치 없이 측정을 행하는 경우에는 이러한 공간 농도의 편차가 커질 수 있음을 고려하여야 한다.

농도에 있어서 특히 큰 차이를 보인 곳은 Zone3의 Room3으로 세 가지 물질 모두 Zone3 내의 다른 실에 비하여 조건 1, 조건 3 모두에서 약 30% 낮은 농도가 측정되었다. 계단실을 통하여 상층부로 유입되는 물질들이 Room3으로 유입되나, Room3은 다른 실보다 용적이 큰 점과 중앙 환기 설비가 설치되어 있어 배기 능력이 컸던 것이 원인으로 생각된다. 또한, 2차 실측 중에서도 상층부로부터 하층부로의 공기 이동이 더 적게 관찰된 조건 3에서 더 큰 편차가 발생하였다.

물질 중에서는 C7F14이 1차 실측 RSD 6.0~13.9%, 2차 실측 19.0~21.4%로 가장 큰 편차를 보였다. C7F14는 다른 두 물질에 비하여 분석 회수율이 약간 낮은 점, 또한 2차 실측에서는 상부층에서 방출시킨 C7F14이 하부층으로 거의 이동하지 않아 하부층에서 검출된 C7F14의 양 자체가 검출 하한치(下限値)에 가까운 미량이었던 점이 원인으로 생각된다. 즉, 상하층간 순환이 거의 이루어지지 않는 상태에 더불어 Zone3에서 방출시킨 C7F14의 방출량이 적었던 것이 오차를 크게 한 요

Table 5 PFT concentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] and distribution deviation

		Con.1			Con.2			Con.3			Con.4			
		C6F6	C7F8	C7F14	C6F6	C7F8	C7F14	C6F6	C7F8	C7F14	C6F6	C7F8	C7F14	
1st	Zone1	Mean	250.8	33.3	14.3	463.7	80.4	82.6	287.6	36.3	24.6	875.6	192.6	209.3
		SD	13.3	2.5	1.3	32.4	2.4	3.9	40.6	0.6	2.7	82.1	11.2	8.4
		RSD%	5.3	7.4	8.9	7.0	3.0	4.7	14.1	1.8	11.0	9.4	5.8	4.0
	Zone2	Mean	206.5	64.4	27.3	276.6	88.1	90.5	162.0	63.9	34.9	642.2	202.8	204.3
		SD	16.6	6.4	0.8	6.4	1.2	6.4	14.2	8.1	1.2	15.5	6.3	51.0
		RSD%	8.0	9.9	3.1	2.3	1.3	7.1	8.8	12.6	3.6	2.4	3.1	25.0
	Zone3	Mean	149.9	37.6	57.0	160.1	39.0	100.0	120.6	39.1	70.5	487.9	144.2	194.5
		SD	4.1	1.2	3.4	7.9	2.4	13.2	6.0	2.1	6.3	6.6	2.6	24.9
		RSD%	2.8	3.3	5.9	4.9	6.2	13.2	4.9	5.3	8.9	1.4	1.8	12.8
2nd	Zone1	Mean	91.8	6.7	1.0	/			107.6	17.8	0.6	/		
		SD	11.1	0.6	0.2				15.7	2.6	0.1			
		RSD%	12.1	9.1	22.4				14.6	14.5	13.8			
	Zone2	Mean	65.7	69.2	2.1				75.0	79.1	2.1			
		SD	9.3	12.0	0.4				12.9	14.3	0.6			
		RSD%	14.1	17.4	20.6				17.2	18.1	26.4			
	Zone3	Mean	57.3	51.1	21.8				57.8	49.8	36.3			
		SD	9.8	8.5	3.1				8.9	7.4	8.7			
		RSD%	17.1	16.7	14.1				15.5	14.9	24.0			

* 1st : Primary, 2nd : Secondary, SD : Standard deviation, RSD : Relative standard deviation [%].

인이 되었다.

2차 실측에서처럼 일정 기류에 의해 내부 환기가 이루어지는 경우에는 복수 물질 농도로부터 환기량을 추정하게 되면 오차가 커지므로, 외기 유입이 발생하는 zone에 방출시킨 한 물질의 방출량과 농도만으로 주택 전체에 대한 환기량만을 산출하는 것이 오차를 줄일 수 있을 것이다.

ISO 16000-8⁽¹⁰⁾에서는 공기령(空氣齡)을 측정하는 경우의 각 측정법의 불확실성에 관하여 설명하고 있다. 이번 실측에서 사용한 CO₂ 가스법은 아니지만, SF₆ 가스 모니터를 사용하는 경우 측정 불확실성을 4%로, 단일 물질을 이용한 PFT법을 11%로 추정하고 있어, 가스 모니터를 이용한 측정법의 정밀도를 더 높게 평가하고 있다. 또한, Sherman^(20,21)은 실시간 측정법(real-time technique)이 적산 측정법(integrated technique)보다 정밀도가 좋으며, 단일 가스법(single-gas technique)보다는 멀티 가스법(multi-gas technique)이 보다 정밀한 결과가 얻어질 수 있다고 기술하고 있다.

본 PFT법의 불확실성을 평가하기 위하여, 방출원 편차와 온도 변화에 의한 방출 속도의 변화는 전자 저울로 계량하는 것으로부터 0으로 가정하였다. 또한, 샘플링 레이트 캐리브레이션의 불확실성은 ISO 16000-8에서 설명하는 일반적인 가치치 5%를 적용하였으며, 샘플러의 공간 대표성 및 물질 농도 분포의 편차는 Table 5의 값을 이용하였다. 용매 추출 및 GC/MS를 이용한 분석 오차는 각 물질에 대하여 12회씩 실시한 회수율 분석 결과로부터 C₆F₆ : RSD 8.4%, C₇F₈ : RSD 8.5%, C₇F₁₄ : RSD 13.7%를 적용하였다.

1차 실측에서 PFT법의 불확실성은 C₆F₆ : 6%, C₇F₈ : 6%, C₇F₁₄ : 7%로 세 가지 물질을 동시에 이용한 PFT법에 대하여 11%, 2차 실측에서는 C₆F₆ : 7%, C₇F₈ : 7%, C₇F₁₄ : 9%로 전체적인 측정 불확실성은 13%로 산정되었다. 1차 실측에서는 각 조건당 샘플링을 10개 지점에서 실시한데 반해, 2차 실측에서는 13개 지점으로 증가시켰으나 일정 기류 발생 및 전체 공간에 대한 C₇F₁₄ 가스 농도가 낮았던 것이 측정 오차를 증가시킨 원인이었다.

또한, 각 zone에 샘플러를 하나씩만 설치하는 경우의 측정 불확실성을 추정하면, 1차 실측 13%, 2차 실측 23%가 되어, 특히 2차 실측에서처럼 측정되는 PFT 농도가 낮은 경우에는 불확실성이 증가하게 된다.

8. 결 론

PFT법은 측정이 간편하고 현장 설치가 손쉽기 때문에, 건축 분야에서의 대량 실측 조사에 유리한 방법이다. 하지만, 물질 농도 분포, 샘플러의 공간 대표성, 방출원 오차, 분석 오차 등의 불확정 요소들을 내포하는

것은 측정자들로 하여금 많은 고려 요소를 요구한다. 이번 연구에서는 상하 높이차가 큰 3층 단독 주택을 수직적으로 3 zone으로 공간 분할하여, 세 가지 물질을 이용한 PFT법에 의한 환기량 측정을 실시하였으며, CO₂ 추적 가스법을 동시 적용하여 실측 정밀도를 확인하였다.

또한, PFT법의 가장 큰 장점은 복수 공간에서의 공기 교환량 및 환기량의 측정이 가능한 점으로, 이번 실측에서도 상하 높이차가 큰 주택내의 상하간 공기 유동에 대하여 해석하고, 환기 시스템 및 환기 조건에 따른 실내의 환기 양상에 대한 평가를 하여, 수직적 공간 분할에 대한 PFT법의 적용 가능성을 검증하였다. 하지만, 물질 방출량이 너무 적거나 일정 기류가 발생하는 경우에는, 혼합이 불충분한 zone이 발생하기 때문에 측정 정밀도가 저하되며, 공간 농도 분포의 불균일함과 오차가 증가하여 측정 불확실성도 커지게 된다. 단, zone간 공기 교환이 어느 정도 존재한다고 상정되는 일반적인 환기 상태하에 있는 주택에 있어서는 교반 팬을 이용함으로써 측정 정밀도를 확보할 수 있는 레벨까지 농도 분포를 줄일 수 있다고 판단되었다.

주택 전체 공간에 대한 평균 환기량으로 결정되어 있는 필요 환기량은, 차후 각 실내 공간에서의 공기 청정도 및 국소 공기령(局所 空氣齡)을 고려한 환기효율의 개념으로 이행하여 갈 것이라 예상된다. 따라서, 각 공간에 대한 개별 환기량과 각 공간 사이에서의 공기 교환량을 알 필요가 있으며, 주택 내에 일정 기류가 발생하거나 환기량이 극단적으로 많은 경우와 같은 특수한 환기 조건을 제외하면 복수 물질을 이용한 PFT법은 유효한 수단이 될 것이다.

참고문헌

1. Peter, W. G., 1989, Measurement ventilation using tracer-gas, pp. 6-11.
2. The society of heating, air-conditioning and sanitary engineers of Japan, 2010, Field measurement methods for ventilation effectiveness in rooms, SHASE standard 115-2010, Japan.
3. The society of heating, air-conditioning and sanitary engineers of Japan, 2003, Ventilation rate measurement of a single zone using tracer gas technique, SHASE standard 116-2003, Japan.
4. Fisk, W. J., Faulkner, D., and Hodgson, A. T., 1993, The pollutant control index : a new method of characterizing ventilation in commercial buildings, Proceedings of Indoor Air '93, Vol. 5, pp. 9-14.
5. Stymne, H. and Eliasson, A., 1991, Development of a new PFT-method for ventilation rate measurements,

- NBS-I, The development of the PFT method in the Nordic Countries, pp. 37-48.
6. Sateri, J. O., 1991, The measurement of ventilation using integrating tracer techniques, NBS-I, The development of the PFT-method in the Nordic Countries, Chapter 1, pp. 11-32.
 7. Sateri, J. and Majanen, A., 2000, The evaluation of field measurements of ventilation parameters made using the passive perfluorocarbon method, *Clima 2000*, Vol. 1, pp. 282-289.
 8. Dietz, R. N. and Cote, E. A., 1982, Air infiltration measurement in a home using a convenient perfluorocarbon tracer technique, *Environment International*, Vol. 8, pp. 419-433.
 9. Japanese Industrial Standards, 2005, Indoor Air-Determination of formaldehyde-Diffusive sampling method, JIS A 1963, Japan.
 10. International organization for standardization, 2007, Determination of local mean ages of air in buildings for characterizing ventilation conditions, ISO 16000-8.
 11. Tabuchi, S., Asai, M., Sakai, S., Marumoto, N., and Tanabe, S., 2004, Application of a simple method for detection and quantifying VOC sources, *Proceedings of Roomvent 2004*, Indoor Air Quality, CD-ROM.
 12. Higashida, H., Aoki, T., Tani, H., Nishimura, E., Kubota, K., Kim, H., Tabuchi, S., Tanabe, S., Murae, Y., and Asai, M., 2005, Measurement of indoor air quality by passive method (Part 16 Ventilation measurement in a multi-family residential building operated by three types of ventilation conditions), *AIJ Proceedings 2005*, D-II, pp. 907-908.
 13. Tabuchi, S., Kubota, K., Higashida, H., Kim, H., Yoshida, K., Tanabe, S., and Kashihara, S., 2005, Measurement of indoor air quality by passive method (Part 19 Field survey for ventilation rates with PFT method), *AIJ Proceedings 2005*, D-II, pp. 913-914.
 14. Hattori, M., Tanaka, Y., Kubota, K., Kim, H., Tanabe, S., Kashihara, S., and Yoshida, K., 2005, Measurement of indoor air quality by passive method (Part 23 Ventilation measurement in a detached house with PFT, CO₂, and SF₆ methods), *AIJ Proceedings 2006*, D-II, pp. 921-922.
 15. Kashihara, S., Matsuda, T., Yoshida, K., Imai, H., and Tanabe, S., 2006, Measurement of indoor air quality by passive method (Part 24 Field survey on ventilation rates with PFT method in a detached house), *AIJ Proceedings 2006*, D-II, pp. 923-924.
 16. Hattori, M., Kashihara, S., Yoshida, K., Tanaka, Y., Kim, H., Kubota, K., and Tanabe, S., 2006, Measurement of indoor air quality by passive method (Part 15 Survey on ventilation measurement by passive method in detached houses), *SHASE Proceedings 2006*, pp. 1241-1244.
 17. Tanaka, Y., Tajima, M., Sato, K., Murae, Y., Hattori, M., Kim, H., and Tanabe, S., 2007, Comparison of PFT Method with Constant-injection, Constant concentration and Theoretical Calculation Methods for Ventilation Measurement, *Proceedings of Roomvent 2007*, CD-ROM.
 18. Kim, H., Tanabe, S., Tajima, M., and Murae, Y., 2009, Comparison of PFT method with SF₆ constant-injection, CO₂ constant-concentration and theoretical calculation method for ventilation measurement under cyclic reversal, *Transactions of AIJ*, pp. 47-54.
 19. Miller, S. L., Leiserson, K., and Nazaroff, W. W., 1997, Nonlinear least-squares minimization applied to tracer gas decay for determining airflow rates in a two-zone building, *Indoor Air 1997*, Vol. 7, pp. 64-75.
 20. Sherman, M. H., 1988, Uncertainty in air flow calculations using tracer gas measurement, LBL-25415, Lawrence Berkeley Laboratory, America.
 21. Sherman, M. H., 1988, On estimation of multizone ventilation rates from tracer-gas measurements, LBL-25772, Lawrence Berkeley Laboratory, America.