

## 환기실험을 위한 추적가스 방법의 응용

### Applications of tracer gas method for ventilation experiments

한 화택  
H. T. Han  
국민대학교 기계자동차공학부



- 1957년생
- 건축설비 및 실내환경에 관련된 유체유동 및 열전달 문제에 관심을 가지고 있다.

#### 1. 머리말

환기란 실내에 기류분포를 형성함으로써 발생된 오염물질을 제거하고 재실자에게 신선외기를 공급하기 위한 것이다. 실내의 오염농도는 오염발생원의 특성과 실내의 환기상태에 의하여 결정되며 환기상태는 실내의 기류분포에 의하여 결정된다. 건축물에서 수행되고 있는 각종 오염물질에 대한 농도측정 실험은 환기의 결과로서 나타나는 실내오염의 정도를 파악하기 위한 것으로 환기의 성능 자체를 측정하기 위한 것이 아니다. 또한 실내의 기류속도 측정실험을 통하여 환기상태를 간접적으로 파악할 수 있으나 정량적인 환기 상태를 측정하지는 못한다. 단순히 기류속도가 크고 작음에 따라서 환기상태의 좋고 나쁨을 표현할 수 없기 때문이다. 그림 1은 이와 같은 환기실험에 관련된 3단계의 실험 종류와 이들 간의 상호 상관관계를 보이고 있다.

실내에서 발생하는 오염물질의 확산 및 분포 거동을 파악하고 실내 공기유동의 적정성을 파악하기 위해서 추적가스를 이용한 환기실험이 수행된다. 추적가스를 주입하고 이의 확산과 이동과정을 관찰함으로써 환기에 관련된 여러 가지 양적인 정보를 측정한다. 추적가스를 이용한 환기실험은

그 응용범위가 매우 넓다. 우선 가장 광범위하게 이용되고 있는 실험은 실내의 공기의 교환율을 측정하는 것이다. 건축물에서의 실제 환기량은 외기에 의한 침투율 등에 의하여 설계된 환기량이나 측정된 덕트 풍량과 일치하지 않는다. 추적가스를

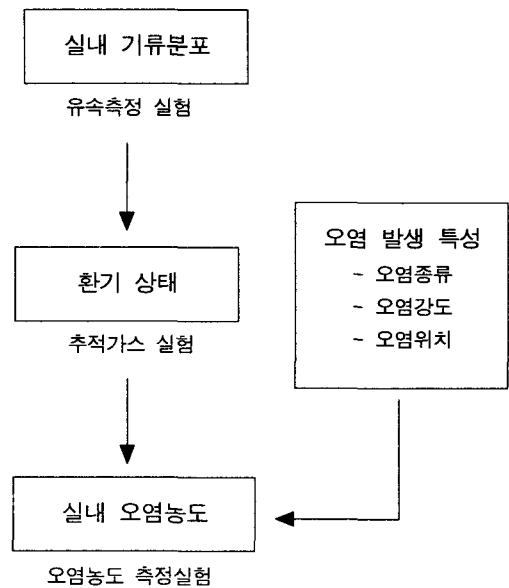


그림 1 실내의 기류분포와 환기상태, 그리고 오염농도의 상관 관계

이용하면 공기교환율을 직접 측정하는 것이 가능하다. 또한 동일한 환기량 하에서도 실내기류분포에 따라서 환기의 성능이 변화한다. 최근 환기의 성능을 정량적으로 나타내기 위한 환기효율의 정의 방법에 관한 연구가 많이 진행되고 있고 이를 측정하기 위한 추적가스 실험방법들이 많이 개발되고 있다. 추적가스를 이용한 실험 방법은 환기량이나 환기효율 뿐만 아니라 기타 여러 가지 산업위생과 관련된 응용범위가 많이 있다. 여기에는 흡후드(fume hood)의 성능 테스트, 건물배기의 재유입 측정실험, 유해물질의 보관성능 실험, 안전 피난처의 평가, 오염원의 강도 측정, 덕트시스템 내의 풍량 측정, 그리고 유해물질의 확산 및 유동 경로추적 실험 등이 있다.

본고에서는 추적가스 실험방법의 일반적인 장치 구성에 관하여 살펴보고 환기량과 환기효율을 측정하기 위한 실험방법에 관하여 설명한다. 또한 기타 산업위생분야에서 환기에 관련된 변수를 측정하기 위한 추적가스 방법의 응용 예를 소개하고자 한다.

## 2. 추적가스 실험 장치

추적가스를 이용한 실험 장치는 일반적으로 그림 2에 보이는 바와 같이 그 응용범위에 관계없이 추적가스의 분배장치, 샘플링 장치, 추적가스

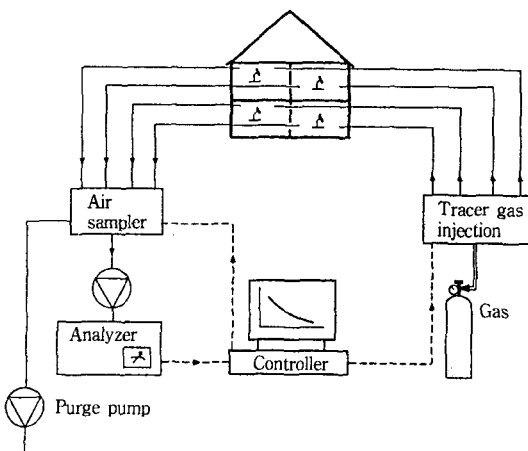


그림 2 환기실험을 위한 일반적인 추적가스 시스템의 구성 예

의 측정장치, 그리고 자료취득 및 제어장치로 구성된다.

### 2.1 추적가스

실내의 환기상태를 파악하기 위하여 추적가스로서 어느 종류의 기체든지 사용이 가능하나 다음과 같은 성질을 갖는 것이 바람직하다.

- 화학적으로 안정하며 무취 무미하여야 한다.
- 비가연성과 비폭발성이어야 한다.
- 사용되는 농도범위에서 인체에 무해하고 알레르기 반응을 일으키지 않아야 한다.
- 대기와 함께 잘 혼합되고 확산되어야 한다.
- 값싸고 쉬우면서도 신뢰성 있게 측정될 수 있어야 한다.
- 공기와 간섭을 일으키지 않고 측정방법이 잘 확립되어 있어야 한다.
- 일반 대기 중이나 실내공기 중에 존재하지 않는 것이 좋다.

역사적으로 헬륨, 수소, 메탄, 이산화탄소, 일산화탄소, 질소산화물, 그리고 방사선 물질 등이 추적가스로 이용되어 왔다. Pettenkofer는 1858년 병원건물에서의 석탄을 연소시킬 때 발생하는 이산화탄소를 추적가스로 이용하여 환기실험을 수행하였다. 그는 인체로부터 추가적으로 발생하는 이산화탄소의 영향과 일산화탄소에 의한 위험성을 지적하였다. 자연환기량을 측정하기 위하여 수소를 추적가스로 이용한 Marley는 추적가스의 부력에 의한 성층화 문제를 지적하였고, Dufton과 Marley는 수증기를 추적가스로 사용하였는데 벽면에 흡착되고 상변화가 일어나는 등 문제점을 언급하였다. Yaglou와 Witheridge는 최초로 환기효율을 정의하였고 이산화탄소를 이용하여 이를 측정하고자 하였다. 이후 추적가스에 대한 위험성 범위가 정확히 파악되고 측정기술이 발달함에 따라서 여러 가지 추적가스를 이용한 환기실험이 수행되고 있다. 표 1은 추적가스로 사용되고 있는 기체의 물성치를 보이고 있다.

질소산화물은 적외선 기술을 이용하여 측정되고 대부분의 국가에서 잠재하는 독성의 범위를 25

표 1 추적가스로 이용되고 있는 기체의 물성치

기 체	분자량	비등점(°C)	밀도(kg/m <sup>3</sup> ) (15°C)	분석방법	측정범위 (ppm)	배경농도 (ppm)	유해성
CO <sub>2</sub>	44	-56.6	1.98	IR	0.05-2000	350	약간
Freon12	121	-29.8	5.13	IR GC-ECD	0.05-2000		
Helium	4	-268.9	0.17	MS	0.001-0.05	5.24	
NO <sub>x</sub>	44	-88.5	1.85	IR		0.03	약간
Sulfur hexafluoride	146	-50.8	6.18	IR GC-ECD	0.05-2000 0.00002-0.5		
Perfluoro- n-hexane	338	57.0		GC-ECD	10 <sup>-6</sup>		

~100ppm 이하로 규제한다. 이산화탄소는 인체나 연료의 산화에 의하여 발생하며 대기 중에 대략 350ppm 정도의 농도로 존재한다. 최근 가장 광범위하게 사용되고 있는 추적가스는 SF<sub>6</sub>가스, 할로겐 냉매, 그리고 과불화탄소 등이다. 이들은 이상적인 추적가스의 성질을 대부분 가지고 있고 ppm의 단위에서부터 ppt의 단위에 이르기까지 측정이 가능하다.

## 2.2 방출 및 분배장치

가스용기로부터 제어된 양의 추적가스를 건물 내의 임의의 위치에서 방출시키고 적절하게 분배하기 위한 장치가 필요하다. 방출 및 분배장치는 추적가스의 누설이 없어야 하며 방출량이 안정적이어야 하나 실험방법에 따라서 정확한 절대량이 요구되지 않는 경우도 있다. 가스 실린더에 부착된 압력 감쇠밸브와 비흡수성 재료로 된 튜브, 그리고 분사되는 가스량을 제어하는 분사기로 구성되어 있다. 추적가스의 방출 및 분배장치는 다음과 같은 것들이 있다.

(1) 일정 질량유량 방출(constant mass flow) : 추적가스 실린더로부터 방출 압력을 일정하게 유지하기 위하여 압력감쇠밸브를 장착한다. 압력감쇠밸브를 통과한 후의 압력은 정확한 마노미터로 측정하고 방출유량을 유량계로 측정한다. 니들 밸브(needle valve)를 이용하여 방출유량을 조절한다. 시중에 나와 있는 것으로 질량유량을 열선

유속계로 점검하여 니들 밸브를 조절함으로써 일정 유량을 유지할 수 있는 질량 유량조절기가 있다. 또한 작은 노즐을 통과할 때 임계압력 이하로 유지함으로써 노즐이 초크(choke)되어 일정유량이 공급되도록 하는 임계노즐(sonic nozzle)도 종종 사용된다.

(2) 고정량 분사(injection of a fixed amount of gas) : 추적가스의 주어진 체적을 방출하기 위한 가장 쉬운 방법으로 눈금이 매겨진 주사기를 이용하는 방법이다.

(3) 수동 추적 가스원(passive tracer gas sources) : 과불화탄소(PFT)는 미량의 분석이 가능하다. 미량의 추적가스를 방출시킬 때 가장 간단한 방법으로 실리콘 막을 통하여 추적가스를 침투하게 하거나 모세관을 통하여 확산되게 하는 방법이 있다. 액체표면의 증발에 의하여 튜브 내에서 포화증기압으로 유지되고 추적가스의 방출량은 방출구를 통한 분자확산 속도에 의하여 결정된다.

(4) 인공혼합 시스템(artificial mixing system) : 실내의 공기가 완전 혼합이 이루어진다는 가정 하에서 환기량을 측정하는 경우가 많다. 실내공기를 혼합하기 위하여 널리 사용되는 방법으로는 공기의 내부순환을 크게 하도록 혼합 팬(fan)을 사용한다. 여기서 팬은 전기적인 장치를 이용하는 작은 냉각 팬이거나 탁상용 팬이 이용된다. 이 방법은 상대적으로 적은 양의 추적가스가

투입될 때 효과적으로 적용된다.

### 2.3 샘플링 장치

측정하고자 하는 공기는 튜브, 밸브, 펌프 등에 의하여 직접 추적가스 측정기로 샘플링 되거나 일정한 용기로 공급되어 임시적으로 저장된다. 샘플링 방법은 추적가스의 종류, 측정방법, 그리고 농도측정기 등에 따라 다르다. 샘플링하는 방법에는 능동적인 방법과 수동적인 방법이 있다. 능동적인 방법이란 펌프를 이용하여 어떤 종류의 샘플 용기에서 가스를 끌어내거나 흡착성 튜브를 통해 가스를 끌어내는데 사용되는 방식이며 수동적인 방법이란 자연스럽게 샘플 용기를 채우고 물리적 이송 과정에 의존하는 방식이다. 샘플링 시스템은 추적가스의 누설이 없어야 하며 샘플 튜브 등에 접촉되지 않아야 하고 샘플링 장치 내에 남아 있는 잔여가스가 충분히 배제되어야 한다.

(1) 포집백 및 포집병(bags or bottles) : 가스의 샘플을 수집하는데 폴리에틸렌이나 폴리에스터와 같은 불활성의 재료로 만들어진 것이 많이 이용된다. 포집백을 채우기 위해서는 우선 압착해서 그 안에 들어있는 잔존 가스를 완전히 빼내야 하며 이후 샘플된 공기를 자동펌프나 수동펌프를 이용해서 포집백에 채운다. 재료에 따라서 샘플가스가 표면에 흡착되기 때문에 샘플을 오랜 동안 유지할 수 없다. 현재 상용적으로 Mylar 또는 Tedlar와 같은 샘플링 백이 많이 이용되고 있다.

(2) 포집용기(container) : 양쪽 끝이 열린 작은 금속제 원통형 용기가 포집용기로 사용된다. 양쪽을 열린 상태로 하여 한쪽 방향으로 샘플을 통과하게 하여 잘 혼합한 후 양쪽 끝을 닫는다. 최소한 두 배 이상의 샘플 공기를 투과시킨 후 포집하여야 한다.

(3) 고형 흡착제(solid adsorbent) : 환기 연구를 위한 고형 흡착제로 목탄(charcoal)이나 다공성 중합체(porous polymer)등이 이용된다. 흡착제에 포집된 가스를 방출하기 위해서 적절한 용매를 이용하거나 열을 가함으로써 방출시키는 것이 있다.

(4) 샘플링 네트워크(sampling network) : 오랜 시간동안 여러 점에서 연속적으로 공기 샘플을

채취하기 위해서는 펌프와 밸브를 제어하는 기구와 튜브로 구성된 샘플링 네트워크를 구성하여야 한다. 두 개의 펌프가 필요한데 하나는 샘플 공기를 채취하는데 필요하며 또 하나는 분석된 공기를 외부로 배출시키는데 필요하다. 주로 나일론이나 폴리에틸렌 관이 이용된다. 금속관도 이용이 가능하나 설치가 용이하지 않다.

### 2.4 농도 측정장치

샘플링 된 기체에 포함되어 있는 추적가스의 농도를 측정하기 위해서 농도측정장치가 필요하다. 최근 가장 광범위하게 이용되고 있는 추적가스 농도측정기의 종류에는 적외선 분석기(infrared spectroscopy), 가스 크로마토그래피(gas chromatography), 질량분석기(mass spectroscopy) 등이 있다.

(1) 적외선 흡수 광분석기(infra-red absorption spectrophotometry) : 추적가스를 분석하는데 많이 쓰이는 분석기로서 빠른 응답특성을 갖는 것이 가장 큰 이점이다. 빛이 가스를 통하여 지나갈 때 흡수되는 주파수는 가스분자가 진동하는 공진주파수나 진동모드의 조화 주파수에 해당한다는 원리는 이용한 측정장치이다. 흡수된 광량에 따라서 셀 내에 야기되는 압력변화를 마이크로폰이나 금속 다이아프램을 이용하여 측정한다. 여기에는 분산형(dispersive) 흡수분석기와 비분산형(non-dispersive) 흡수분석기가 있다. 분산 흡수분석기는 측정하고자 하는 기체의 고유한 주파수 대역의 미세한 주파수대에 맞추어 작동되고 비분산 흡수분석기는 적외선 방사의 전체 주파수대가 사용된다. 현장시험에 대해 적합한 장치로 치밀하고 튼튼하게 구성되어 있으나 선택사양이 부족하다는 것이 단점이다.

(2) 가스 크로마토그래피(gas chromatography) : 이 방법은 기본적으로 분리관을 이용하여 물질을 분리하는 방법으로 측정하는 기체에 대하여 선택적으로 작용할 필요가 없다. 분리관을 운반가스(carrier gas)에 의하여 씻어낸 후 샘플을 투입하면 샘플가스에 포함되어 있는 기체분자들은 고체 또는 액체로 된 흡착제에 대한 용해도에 따라서 관로를 따라서 통과하는데 걸리는 시간이 각각 다

르게 된다. 이러한 원리를 이용하여 분리관 끝에 도달하는 기체를 시간대별로 분리하여 검출한다. 검출기에는 열전도도 검출기(thermal conductivity detector), 불꽃이온화 검출기(flame ionization detector), 전자포획 검출기(electron capture detector), 그리고 불꽃광도 검출기(flame photometric detector) 등이 있다. 검출기에 의하여 나타나는 신호를 크로마토그램(chromatogram)이라고 하며, 각각의 기체에 대하여 시간 차를 두고 최대값을 보이는데 피크 높이와 곡선의 면적을 측정함으로써 그 기체의 농도를 측정한다. 가스크로마토그래피는 기체를 흡착하는 정지상(stationery phase)에 따라서 GSC(gas-solid chromatography)와 GLC(gas-liquid chromatography)로 구별되나, 대부분 액체상을 이용한 GLC가 많이 사용되고 있다.

(3) 질량 분석기(mass spectrometry) : 분자 이온은 전기장내에서 가속할 때, 질량과 전하의 비에 따라서 분류되어진다. 그러므로 질량분석기에서는 일단 분자가 이온화되어야 한다. 정밀한 질량분석기는 보통 매우 고가이며 분석시간이 빠르고 여러 가지 기체를 동시에 연속적으로 측정할 수 있다.

(4) 화학 지시튜브(chemical indicator tube) : 전기펌프나 수동식 벨로우프(bellow pump)는 측정하고자 하는 기체와 반응하여 색깔이 변화하는 반응물로 채워진 고체흡수관을 통과시킴으로써 농도를 측정한다. 매우 간단하고 직접적인 측정이 가능하나 정밀한 측정을 위해서는 보정이 필요하고 지시튜브를 한번밖에 사용할 수 없는 단점이 있다.

이들 추적가스 농도측정장치를 선정할 때는 실험의 종류와 목적에 따라서 다음과 같은 감도, 선택도, 반응속도 등의 계측기 특성을 고려하여야 한다.

- 감도(sensitivity) : 측정기의 감도가 좋을수록 낮은 농도 범위에서 실험이 가능하다. 특히 넓은 공간에 대한 실험을 수행할 때 감도가 좋은 측정장치가 필요하다. 그렇지 못한 경우, 많은 양의 추적가스가 필요하고 높은 농도범위는 실험자에게도 바람직하지

못하다.

- 선택도(selectivity) : 측정하고자 하는 특정한 가스의 농도에만 의존하고 공기 중에 포함되어 있는 다른 가스의 영향을 적게 받는 것이어야 한다.
- 측정속도(time constant) : 실내의 농도변화에 비하여 측정기의 측정속도가 빨라야 한다. 이것은 일정한 농도범위에서와 같이 빠른 피드백 제어를 요구하는 경우에 특히 중요하다. 또 여러 점에서의 농도를 하나의 측정기로 연차적으로 측정하고자 하는 경우에 측정속도가 문제가 될 수 있다. 질량분석기의 경우 수백분의 1초에서부터 가스분석기의 경우 몇 분에 이르기까지 다양하다.

## 2.5 기타 관련변수 측정장치

실험을 수행하는 건물이 위치한 곳의 외부 풍속과 풍향을 기록하고 실내외의 온도를 취득할 수 있는 기상계측장비가 필요하다. 이와 같은 기상데이터는 그 지역의 기상대로부터 입수할 수 있다. 단 환기량 측정결과와 기상과의 관계를 측정하고자 하는 경우에는 휴대용 기상장비를 이용하여 건물에 의하여 영향을 받지 않는 위치에서 직접 측정하여야 한다.

## 3. 추적가스를 이용한 환기실험

### 3.1 환기량의 측정실험

실내의 환기량 또는 공기교환량은 환기에 있어서 가장 기본적인 양으로 실내의 공기질이나 에너지 사용량과 밀접한 관계가 있다. 환기량을 측정하는 방법에는 송풍기 가압방법과 추적가스를 이용한 방법이 있다. 송풍기 가압방법은 실내를 블로어도어(blower door)를 통하여 송풍기로 가압한 상태에서 주입되는 풍량을 측정한다. 틈새 간극을 통한 외기 침투율을 측정하기 위한 것으로서 건물의 밀폐도(tightness)를 측정하는데 주로 사용된다. 이 방법은 매우 큰 송풍기를 필요로 하므로 실용적이지 못하고, 건물의 외피에 압력에 의한 피해를 줄 수 있다. 반면 추적가스를 이용한 환기량 측정방법은 건물외피에 영향을 주지 않

면서 외기와와의 공기교환량을 비교적 손쉽게 측정할 수 있다. 공기교환량을 실내체적으로 나눈 값을 공기교환율(air change rate)이라고 하며 이의 역수를 명목시간상수(nominal time constant)라고 한다.

$$ACH = Q/V \quad (1)$$

추적가스의 특정한 주입방법과 샘플방법에 따른 공기교환율의 측정방법에는 농도감쇠법(concentration decay method), 정량주입법(constant injection method), 그리고 일정농도법(constant concentration method)등이 있다. 이들 방법에 관한 비교가 표 2에 나와 있다.

표 2 공기교환율 측정방법의 비교

	측정 속도	시간에 따른 변동	복잡한 실내형상	장비의 복잡성
농도감쇠법	빠름	부적합	보통	간단
정량주입법	보통	적합	보통	보통
일정농도법	늦음	적합	좋음	복잡

(1) 농도감쇠법 : 농도감쇠법은 가장 간단하고 널리 사용되고 있는 방법으로 초기에 일정량의 추적가스를 주입하여 실내공기를 혼합한 후 초기농도와 말기농도를 측정하여 지수식으로부터 공기교환율을 구하는 방법이다.

$$\frac{Q}{V} = \frac{1}{T} \ln\left(\frac{C_1}{C_2}\right) \quad (2)$$

여기서 T는 측정시간 ( $t_2-t_1$ )이고  $C_1$ 과  $C_2$ 는 각각  $t_1$ 과  $t_2$  시간에서의 추적가스농도이다. 이 방법은 초기농도와 말기농도 값에 전적으로 의존하여 구하므로 오차가 크게 발생할 수 있다. 농도측정값에 따른 오차를 줄이고 보다 정확한 환기량을 측정하기 위해서는 일정 시간 간격으로 연속적으로 측정된 농도값을 이용하여 회기분석법(re-

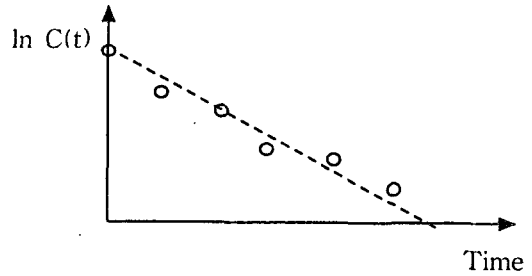


그림 3 회기분석에 근거한 농도감쇠법

gressional analysis)에 의하여 구한다. 지수적으로 감쇠하는 농도 측정값은 세미로그 그래프에서 직선식으로 나타난다. 이를 1차식으로 직선 접합(linear curve fitting)하여 기울기를 구하면 이것이 곧 공기교환율,  $Q/V$ 가 된다.

(2) 정량 주입법 : 정량주입법은 일정량의 추적가스를 실내에 방출하면서 실내의 농도변화를 측정하는 방법이다. 실내의 평균 명목시간상수에 비하여 상대적으로 작은 시간상수를 가지고 있는 실내유동에 대하여 유동 변화에 관계없이 평균환기량의 정확한 추정값을 제공한다. 환기량이 일정하게 유지되는 경우에는 정상상태의 평형농도를 이용하여 다음의 식으로 평균 환기량을 계산할 수 있다.

$$Q = \frac{\dot{m}}{C(\infty)} \quad (3)$$

여기서,  $C(\infty)$ 는 측정된 실내의 평형농도이고,  $\dot{m}$ 는 일정하게 주입되는 추적가스 발생량이다.

(3) 일정 농도법 : 일정 농도법은 실내에 일정한 농도를 유지하기 위하여 필요한 추적가스의 주입율을 측정하는 방법이다. 실내의 농도를 일정하게 유지하기 위하여 좀 더 정교한 자동 제어 장비를 필요로 한다.

$$Q(t) = \frac{\dot{m}(t)}{C} \quad (4)$$

여기서,  $Q(t)$ 는 외부로부터 공간내로 유입되는 환기량이며  $C$ 는 일정하게 유지되는 추적가스의 농도레벨이다.  $\dot{m}(t)$ 는 시간  $t$ 에서 농도를 유지하

기 위해 요구되는 추적가스의 주입량이다. 이 방법은 시간에 따라서 변화하는 환기량을 측정할 수 있는 이점이 있다.

### 3.2 환기효율의 측정실험

환기효율은 최근 많은 관심이 모아지고 있는 분야이다. 동일한 환기량에 대하여 효율적으로 실내공기를 분배하고 오염물질을 제거할 수 있도록 하기 위해서 환기효율에 대한 고찰이 필요하다. 환기효율을 증가시킴으로써 실내공기질의 향상과 에너지 사용량의 감소를 꾀할 수 있다.

공기의 연령(age)이란 그림 4에 나타난 바와 같이 급기구를 통하여 실내로 유입된 공기입자가 임의의 점 P까지 도달할 때까지 걸리는 시간을 의미한다. 또 잔여체류시간(residual life time)은 그 점에서 시작하여 배기구로 빠져나갈 때까지 실내에 머무는 시간을 의미한다. 평균연령은 급기의 도달성능을 나타내며 평균 잔여체류시간은 배기 성능을 나타내는데 이용할 수 있다. 즉 환기효율은 평균 공기연령이나 평균 잔여체류시간을 이용하여 명목시간상수와와의 비율로서 정의한다. 공기연령에 관한 이론은 다른 참고문헌을 참조하기 바라며 여기서는 추적가스를 이용한 환기효율의 측정방법에 관하여 설명한다.

(1) 국소 공기교환 지수 : 급기구를 출발한 공기가 실내의 임의의 점까지 도달하는데 걸리는 시간을 구하기 위해서는 급기구에 추적가스를 방출하고 실내에서 추적가스의 농도 변화를 측정하여야 한다. 추적가스를 주입하는 방법에 따라서 체승방법, 체강방법, 그리고 펄스방법 등이 있다. 실내의 임의의 점 P에서의 체승방법(step-up

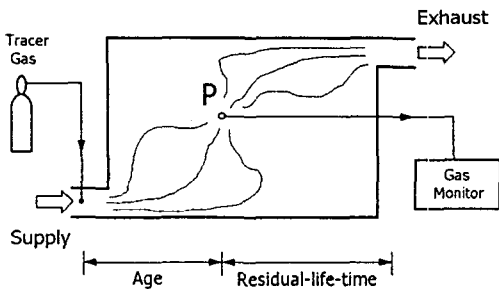


그림 4 공기 연령의 측정 실험

method)에 의한 평균공기연령(LMA : Local mean age)은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\tau_p = \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{C_p(t)}{C_{\infty}}\right) dt \quad (5)$$

여기서  $C_p(t)$ 는 P점에서 측정된 추적가스의 농도이며  $C_{\infty}$ 는 정상상태 도달 후의 농도이다. 즉 국소평균연령은 시간-농도곡선에서 위 면적에 해당한다. 또한 그 점에서의 국소환기효율을 나타내는 국소 공기교환지수(local air change index)는 명목시간상수  $\tau_n (=V/Q)$ 과의 비율로 다음과 같이 구한다.

$$\alpha_p = \frac{\tau_n}{\tau_p} \quad (6)$$

(2) 실평균 공기교환효율 : 실 전체에 대한 평균연령(room mean age)은 국소평균연령을 전체 공간에 대하여 공간평균을 취함으로써 구한다. 또는 배기구에서의 농도변화 과정으로부터 실평균연령을 구할 수도 있다. 체승방법인 경우의 실평균연령은 다음의 식에 의하여 구한다.

$$\langle \tau \rangle = \frac{Q}{V} \int_0^{\infty} t \left(1 - \frac{C_{ex}(t)}{C_{\infty}}\right) dt \quad (7)$$

실 전체의 환기효율을 나타내는 공기교환효율(air change efficiency)은 실평균연령과 명목시간상수의 비율로서 정의된다. 최대효율을 보이는 변위환기(displacement ventilation)의 경우를 100%로 나타내기 위하여 이를 2로 나눈 것으로 정의하는 경우가 많으며, 그러면 완전혼합(complete mixing)시 50%의 효율을 보인다.

$$\langle a \rangle = \frac{\tau_n}{2 \langle \tau \rangle} \quad (8)$$

### 3.3 환기 덕트 시스템내의 풍량 측정 실험

추적가스 방법은 환기율이나 환기효율의 측정

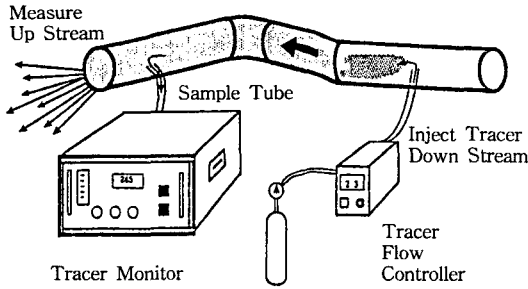


그림 5 단순 환기덕트내의 풍량측정 실험

뿐만 아니라 환기덕트 시스템 내에서의 여러 가지 환기실험에 응용될 수 있다. 가장 간단한 예로 유속을 측정하는 대신 주입된 추적가스량과 측정된 추적가스의 농도를 이용하여 단순 덕트내의 풍량을 측정할 수 있다. 덕트 단면에서의 유속분포가 균일하지 않거나 복잡한 형상의 단면에 대해서 풍속을 직접 측정하는 것보다 추적가스의 농도를 측정하여 풍량을 계산하는 것이 더욱 정확한 경우가 많다. 또한 유속분포의 측정이 불가능한 경우에는 이 방법이 매우 유용하다.

또 두 개의 덕트 풍량이 서로 혼합될 때, 한쪽 덕트에 추적가스를 방출하여 풍량이 합쳐지기 전과 합쳐진 후 덕트에서의 추적가스 농도를 측정함으로써 혼합 풍량비를 매우 정확하게 측정할 수 있다. 또한 이를 연장하여 전체 공조 덕트 시스템에서 외기도입량, 재순환량과 같은 풍량이나 외기도입율, 재순환율과 같은 혼합비를 측정하는데 요긴하게 이용할 수 있다.

### 3.4 건물내의 오염확산 및 거동 측정실험

추적가스를 이용하여 복잡한 구조의 건물이나 산업환경에서의 여러 가지 기류패턴에 의한 오염확산과 거동을 측정할 수 있다. 하나의 존(zone) 내에서 기류의 이동경로를 파악하거나 한 존에서 다른 존으로의 공기 이동량을 측정할 수 있다. 한 가지의 추적가스로는 한 가지의 기류경로에 대한 추적이 가능하므로 여러 가지의 기류경로에 대하여 실험하기 위해서는 여러 종류의 추적가스를 동시에 사용하여야 한다. 동시에 3개 또는 4개 이상의 가스를 이용하여 실험하는 것은 매우 복잡하고 지루한 실험이 되지만 그 결과는 실내공간

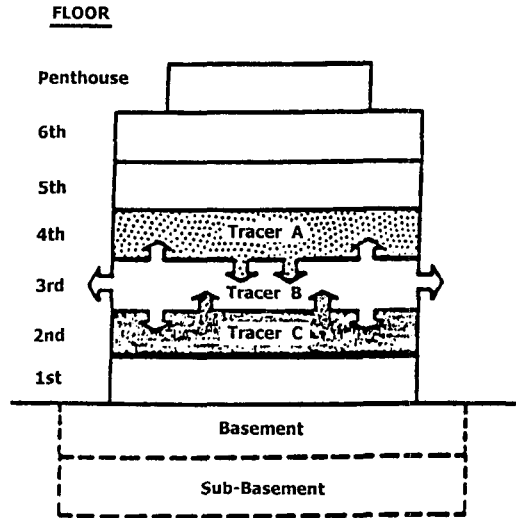


그림 6 멀티가스에 의한 존별 이동 공기량 측정실험

이나 산업현장에서 매우 유용한 결과가 될 것이다. 이러한 실험을 이용하여 건물 내 구분되어 있는 존별 공기의 이동량을 측정하거나 작업현장내 오염물질의 확산에 의한 잠재적인 위험성에 대한 평가를 내릴 수 있을 것이다. 멀티 존(multi zone)에서의 다중 추적가스 실험방법을 단순화하여 실용적으로 사용되기 위해서 앞으로도 많은 연구가 필요하다.

### 3.5 흡후드의 재유입과 재순환 실험

실험실에서 유해물질을 배기하기 위하여 흡후드(fume hood)가 종종 사용된다. 유해물질을 그대로 사용하면서 흡후드의 성능평가를 하는 것은 매우 위험하다. 유해물질의 재유입(re-entrainment)과 재순환(re-circulation)여부를 실험하기 위하여 후드주위에 일정량의 추적가스를 분사하고 추적가스의 농도를 측정한다. 만약 실험실내에서 추적가스가 감지된다면 흡후드에 의한 배기가 실험실내로 재유입되거나 재순환됨을 의미한다. 재순환이란 오염물질이 흡후드에 의하여 배기되지 못하고 그대로 실험실내에 머물러 있는 것을 말하고 재유입이란 건물 밖으로 배기된 오염물질이 여러 경로를 통해 다시 건물내로 유입되는 것을 말한다. 이 때 흡후드 덕트내의 농도는 다음과



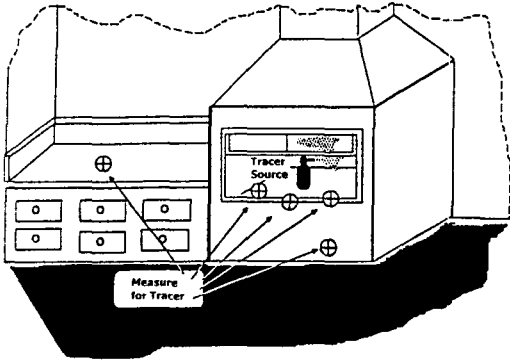


그림 7 흡후드의 배기성능 측정 실험

같이 표현된다.

$$C_{duct} = \frac{C_{tracer} \cdot \dot{m}}{Q_{duct}} \quad (9)$$

여기에서  $\dot{m}$ 은 추적가스의 시간당 주입량,  $C_{tracer}$ 는 추적가스 방출농도, 그리고  $Q_{duct}$ 는 덕트 내의 풍량이다.

회석의 정도를 나타내는 회석비는 배기덕트 농도와 실험실 농도의 비율로서 표시된다. 추적가스를 이용하여 회석비(dilution ratio)를 구함으로써 흡후드를 통해 배기되는 특정한 유해물질로부터 실험실에 있는 사람들의 위험에 대한 잠재적인 평가를 할 수 있다.

$$D = \frac{C_{lab}}{C_{duct}} \quad (10)$$

실험의 결과는 최소의 에너지 소비로 작업자의 안전을 보장할 수 있는 흡후드의 최적배기 설계에 응용될 수 있다.

### 3.6 유해물질의 건물 유입/재유입 실험

건물 주위에 있는 오염원에 의한 유해물질이 건물내로 유입되는 경우가 흔히 있다. 예를 들어 건물 옆에 위치한 주차장에서 자동차 배기가스가 건물의 외기도입구나 창문을 통하여 유입되는 경우가 있다. 유해물질의 건물로의 유입 정도를 파

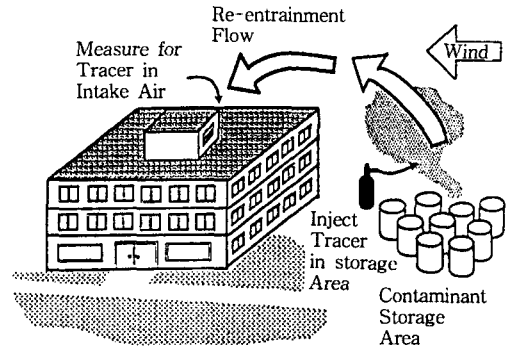


그림 8 외기도입구를 통한 유해물질의 건물유입 측정실험

악하기 위해서 추적가스를 방출하여 실내로 유입되는 양을 측정한다. 이러한 방법은 건물의 외기도입구를 선정하거나 변경할 때 이용될 수 있다.

또한 건물 자체에서 배출되는 배기에 포함되어 있는 오염물질이 주위 건물의 구조와 바람의 방향에 따라서 건물내로 재유입되는 경우가 종종 있다. 추적가스를 건물 배기구나 굴뚝에서 방출하고 건물내에서 추적가스의 농도변화를 측정함으로써 건물배기가 재유입되는 것을 시험할 수 있다.

### 3.7 유해물질의 보관성능 측정실험

추적가스 방법은 유해물질 보관시스템의 성능을 시험하기 위하여 사용될 수 있다. 오염농도가 높은 위험지역의 유해물질이 틈새 등의 경로를 통하여 안전지역(safety area)으로 유입되지 않아야 한다. 유효 누설율(effective leakage rate)은 오염농도가 높은 위험지역으로부터 안전지역으로의 총 누설량으로서 다음과 같이 정의된다.

$$L_{eff} = \frac{C_p}{C_{con}} \cdot Q_p \quad (11)$$

여기에서  $L_{eff}$ 는 유효누설율,  $C_p$ 는 안전지역의 추적가스 농도,  $C_{con}$ 은 위험지역의 농도, 그리고  $Q_p$ 는 안전지대의 환기량이다. 추적가스를 이용하여 위험지역과 안전지역의 농도비를 측정함으로써 누설량을 측정할 수 있다. 이렇게 구한 누설량을 이용하여 안전지역에 있는 작업자에 대한 오염물질에 의한 잠재적 위험성을 평가할 수 있다.

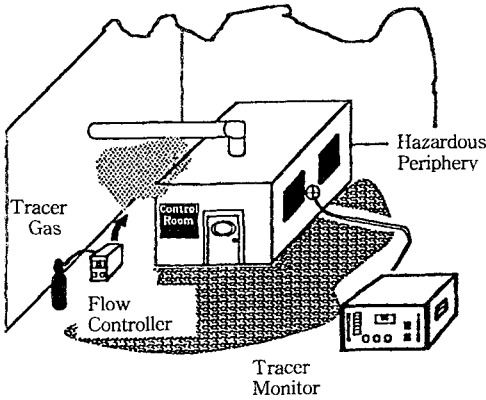


그림 9 유해물질 보관시스템의 보관성능 또는 안전구역의 안전성 측정 실험

### 3.8 오염원 강도의 측정실험

실내에 있는 오염원의 오염발생량은 실내외의 오염물질 농도차를 측정함으로써 측정할 수 있다. 이때 실내외의 공기교환량은 추적가스 방법을 이용하여 측정한다. 오염원의 강도는 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma_{pollutant} = \frac{\Delta C_{pollutant}}{Q_{in}} \quad (12)$$

여기서,  $\Delta C_{pollutant}$ 는 외부와 내부 오염농도의 차이이고  $Q_{in}$ 은 공간 내에서의 추적가스 실험에 의해 측정된 유입풍량이다. 오염물질에 의한 실내외의 농도차를 측정하고 추적가스를 이용하여 환기량을 측정함으로써 오염원의 강도를 계산한다.

### 4. 맺음말

지금까지 추적가스를 이용한 환기량 및 환기효율의 측정방법, 그리고 기타 환기관련 실험방법의 예를 보였다. 추적가스를 이용한 실험방법은 위에 열거한 환기나 산업위생에 관련된 응용범위 외에도 무궁무진한 응용범위를 가지고 있다. 이러한 실험방법은 단순한 실험에 대해서는 비교적 정립이 잘 되어 있지만 조금 복잡한 경우에 대해서는 아직도 많은 연구가 필요하다. 특히 대공간에서의 측정방법이라든가, 멀티 존에서의 측정방법, 다중

추적가스를 이용한 방법 등에 관한 연구가 계속 진행되어야 할 것이다. 앞으로 추적가스를 이용한 환기 실험 방법에 대한 연구와 응용분야의 개발, 그리고 이를 이용한 산업현장에서의 활용이 좀 더 활발하게 이루어지기를 기대한다.

### 참 고 문 헌

1. AIVC, "A Guide to Air Change Efficiency," Technical Note, AIVC28, Air Infiltration and Ventilation Centre.
2. ASHRAE Standard 111, 1988, "Practices for Measurement, Testing, Adjusting, and Balancing fo Building Heating, Ventilation, Air-Conditioning, and Refrigeration Systems."
3. ASHRAE, 1997, "Measuring Air-Change Effectiveness," ANSI/ASHRAE 129-1997, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Atlanta.
4. ASHRAE, 1997, 'ASHRAE Handbook-Fundamentals,' American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Atlanta.
5. ASTM, 1993, "Standard Test Methods for Determining Air Change in a Single Zone by Means of a Tracer Gas Dilution," ASTM E741-93, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
7. Cheon, K. W. and Riffatm S. B., 1992, "Application of Tracer Gas Techniques for Measurement of Friction Factors of Rectangular Ducts," Air Infiltration Review 13.
8. Dufton, A. F. and Marley, W. G., 1935, "Measurement of Rate of Air Change," Institution of Heating and Ventilating Engineers, Vol. 1, pp. 645.
9. Etheridge, D. and Sandberg M., 1996,

- 'Building Ventilation-Theory and Measurement,' John Wiley & Sons, New York.
10. Grot, R. A. and Lagus, P. L., 1991, "Application of Tracer Gas Analysis to Industrial Hygiene Investigations," *Lagus Applied Technology*.
  11. Marley, W. G., 1936, "The Measurement of Rate of Air Change," *Institution of Heating and Ventilating Engineers*, Vol. 2, pp. 499.
  12. Pettenkofer, M., 1858, "Luftwechsel in Wohngebäuden," *Der J.G Cotta'schen Buchhandlung, Literarisch - Artistische Anstalt, Munich*.
  13. Technical Note AIVC 34, "Air Flow Patterns within Buildings-Measurement Techniques," *Air Infiltration and Ventilation Centre*, 1991.
  14. Yaglou, C. P. and Witheridge, W. N., 1937, "Ventilation Requirements," *ASH-VE Trans.*, Vol. 42, pp. 423~436.
  15. 한화택, 1992. "환기효율에 관한 수치해석적 접근," *공기조화 냉동공학회지*, 제21권, 제4호, pp. 271~281.
  16. 한화택, 1999, "환기효율의 정의에 관하여," *공기조화냉동공학회지*, 제28권, 제1호, 38~47.