

## 환기효율의 정의에 관하여

### On the definition of ventilation effectiveness

한 화 택

H. T. Han

국민대학교 기계자동차공학부



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

#### 1. 머리말

기계의 작동 성능을 표시하거나 어떤 현상을 설명할 때 효율이라는 말을 흔히 사용한다. 효율이라는 말은 주어진 입력량에 대하여 출력으로 얻을 수 있는 유용한 양으로 정의되기도 하고 손실이 없는 이상적인 상태나 잘 알려진 기준상태에 비하여 실제 상황에서 얻을 수 있는 결과의 비율로 정의되기도 한다.

그러면 환기효율이란 무엇인가? 환기에 있어서 효율이란 표준적인 환기상태를 기준으로 하여 실제 상황에서의 환기의 효과를 나타낼 수 있어야 한다. 환기효율을 정의하기 위해서는 이러한 환기의 효과를 어떻게 정량화하고 수치화 하느냐가 문제이다. 지금까지 많은 연구자들에 의하여 여러 가지 형태로 환기효율이 정의되어 왔다. 그러나 아직까지 환기효율의 개념과 용어가 명확히 정립되어 있지 못하여 개념상 또는 용어의 사용상 혼란을 주는 경우가 많이 있다.

본고에서는 지금까지 환기효율의 정의가 어떻게 시작되고 진척되어 왔는지를 살펴보고 기존의 용어와 개념들의 상호관계를 고찰함으로써 환기효율의 정의에 관한 내용을 체계적으로 정리해 보고자 한다.

#### 2. 환기효율의 정의 방법에 관하여

처음 환기효율이라는 용어를 사용한 것은 1937년 Yaglou와 Witheridge<sup>1)</sup>에 의해서였다. Yaglou는 공기 중에 있는 냄새의 강도를 나타내는 7단계 척도를 제안한 사람이다. 그는 인체에서 발생하는 실내 이산화탄소의 농도와 배기구에서의 농도비율 이용하여 환기효율을 정의하였다. 실내의 평균농도에 비하여 배기구의 농도가 높은 것이 실내의 오염물질을 효과적으로 배출시키는 것이므로 농도비율 이용하여 이와같이 정의하였다. 이러한 정의는 지금도 많은 의미를 제공하고 있지만 그 당시로서는 냄새측정에서의 마찬가지로 농도측정을 주관적인 측정에 의존하는 경우가 많아서 환기효율에 관한 정의가 실용화되지는 못하였다.

이후 화학공학을 전공하고 있던 Danckwerts<sup>2)</sup>, Spakling<sup>3)</sup> 등은 반응로 내에서의 혼합특성을 연구하기 위하여 연령, 체류시간 등의 수화적인 개념들을 제안하고 있었다. 이들은 화학 반응로 내에서의 가스의 혼합과 실내에서의 공기혼합과의 유사성을 언급한 바 있으나 환기 연구에까지 확대하여 적용하지는 않았다.

이러한 개념들을 환기에 본격적으로 적용한 것은 스웨덴의 Sandberg 교수 연구팀에 의해서였다.

Sandberg<sup>4~7)</sup>는 상대효율, 절대효율, 정상상태효율, 비정상상태효율 등 여러 가지 형태의 환기효율을 체계적으로 정리하였으며 공기연령의 개념을 이용한 환기효율을 제안하였다. 실내에 공급된 신선외기가 실내 공간으로 공급될 때까지 소요되는 시간이 짧을수록 환기효율이 높다고 정의하였다. ASHRAE<sup>8)</sup>와 AIVC<sup>9)</sup> 등은 물론 현재 사용되고 있는 대부분의 환기효율의 개념은 그의 이러한 연구결과에 근거하고 있다.

일본 동경대학의 Murakami교수<sup>10,11)</sup>은 이러한 평균연령의 개념에 근거한 환기효율을 포함하여 오염물의 시간적 공간적 실내 확산 정도에 근거한 환기효율등 6가지의 환기효율 척도를 제안하였다. 이 중에서 확산정도에 근거한 정의는 환기효율의 개념을 수학적으로 연장하는 효과는 있으나 실용성은 미흡하다.

이전에 평균연령 및 농도비에 의한 정의 이외에 농도의 감소율을 이용한 정의가 시도되기도 하였다.<sup>12,13)</sup> 완전혼합의 경우를 기준으로 하여 농도가 감소되는 정도에 따라 환기효율을 표시하고자 하였는데, 농도감소율이 측정시간에 따라 일정하지 않으며 위치에 따른 감소율의 변화를 표시하기에는 근본적인 한계가 있는 등 여러 가지 문제점이

발견되었다. 따라서 농도의 감소율을 이용한 방법은 환기효율의 측정보다는 환기량이나 환기율의 측정에 주로 이용되고 있다.

표 1에는 지금까지 설명한 농도비, 농도감소율, 그리고 공기의 연령에 근거한 환기효율의 정의 및 특징을 보여주고 있다. 환기의 효율을 표시할 때 오염원의 위치에 관계없이 실내 기류분포에 의한 환기상태를 정량화하는 것이 바람직하므로 본고에서는 공기연령의 개념에 근거한 정의를 이용하여 전개해 나가기로 한다.

### 3. 환기효율이라는 용어에 관하여

문헌을 읽다보면 환기효율이라는 용어 자체부터 혼란스러울 때가 있다. 그 이유는 ventilation effectiveness 또는 ventilation efficiency라는 용어가 여러 가지 형태의 환기효율을 총칭하는 보통 명사로 사용되는 경우가 있는가 하면 특정한 양으로 정의된 전문용어로 사용되는 경우가 있기 때문이다. 여기서 effectiveness란 일반적으로 효율성 또는 효과성이라는 보다 광범위한 의미를 갖고 있으며 efficiency란 0과 1사이의 값을 갖는 효율이라는 좁은 의미를 갖고 있으나 어느 쪽을

표 1 환기효율의 정의 방법에 따른 특징

| 정의 방법                       | 정의 및 특징  |
|-----------------------------|--|
| 농도비에 의한 정의(농도)              | 배기구에서의 오염농도에 대한 실내의 오염농도의 비율로서 환기효율을 정의함.<br>- 실내의 기류상태 뿐만 아니라 오염원의 위치에 따라서 값이 변화함.<br>- 환기효율보다는 실내오염정도를 표시하는데 적합함.  |
| 농도감소율에 의한 정의 (농도곡선의 기울기)    | 완전혼합시의 농도감소율에 대한 실제 오염농도 감소율의 비율로서 환기효율을 정의함<br>- 농도감소 초기에는 감소율이 시간에 따라서 변화함.<br>- 일정시간 경과 후에는 농도감소율이 위치에 관계없이 일정해짐.<br>- 비정상상태의 농도측정이 필요함.<br>- 환기효율보다는 환기율을 표시하는데 적합함. |
| 공기의 연령에 의한 정의 (농도곡선의 아래 면적) | 명목시간상수에 대한 공기연령의 비율로서 환기효율을 정의함.<br>- 오염원의 위치에 무관하게 실내의 기류상태에 의하여 결정됨.<br>- 오염물질 배출능력이 아닌 급기의 실내 분배능력을 나타냄.<br>- 비정상상태의 농도측정이 필요하며 정의 및 계산절차가 복잡함.                       |

사용하더라도 개념상 크게 차이는 없으므로 여기서는 구별하지 않고 혼용하기로 한다.

ASHRAE Handbook<sup>8)</sup>을 살펴보면 ventilation effectiveness는 실내에서 발생한 오염물질을 제거하는 능력을 나타내고 air change effectiveness는 급기를 실내로 공급하는 능력을 나타낸다고 설명하고 있다. 즉 ventilation effectiveness는 급기를 실내로 공급하는 능력을 나타낸다고 설명하고 있다. 즉 ventilation effectiveness는 배기효율의 개념을 갖고 있고, air change effectiveness는 급기효율의 개념을 갖고 있다고 볼 수 있다. 그러나 수식을 동반한 정량화 과정에서는 공기연령의 개념을 이용한 air change effectiveness에 관한 내용만을 기술하고 있다. 따라서 독자들은 ventilation effectiveness를 air change effectiveness에 반대되는 개념으로서의 전문용어로 받아들여야 할지 또는 air change effectiveness 등을 포함하는 의미로서의 보통명사로 받아들여야 할지 혼동이 되는 것이다. AIVC의 Technical note<sup>9)</sup>에서도 effectiveness 대신 efficiency라는 용어가 사용되었을 뿐 ASHRAE에서와 마찬가지로 두가지 개념의 차이를 적절히 설명하지 못하고 있다.

Sandberg와 Sjöberg<sup>6)</sup>는 명목시간상수로 무차원화된 실험평균 공기연령의 역수를 air diffusion efficiency라는 용어로 정의한 바 있다. 이것은 현재 ASHRAE에서 사용하고 있는 air change effectiveness에 해당한다. 이후 Sandberg<sup>7)</sup>는 이것을 air exchange efficiency라고 정의하였으며, 이것과 다른 개념으로서 오염물질의 제거능력을 나타내는 contaminant removal effectiveness란 용어를 사용한 바 있다.

여기서 급기효율과 배기효율의 개념으로 사용된 용어를 정리하면 표 2와 같다. 결론적으로 환기효율을 보통명사로 이해하고, 급기의 효율을 나타내는 급기효율과 배기의 효율을 나타내는 배기효율로 이해하면 될 것으로 생각한다. 배기효율을 나타내는 ventilation effectiveness 또는 ventilation efficiency라는 용어 때문에 오해가 발생할 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 급기효율과 배기효율의 개념 제언

##### 4.1 연령과 잔여체류시간

그림 1은 연령과 잔여체류시간의 개념을 나타내고 있다. 급기구를 통하여 실내로 유입된 공기가 실내 임의의 점에 도달할 때까지 소요된 시간을 연령(age)이라고 한다. 공기입자는 여러 가지 경로를 통하여 그 지점에 도달할 수 있기 때문에 그 지점에 도달하는 공기입자 연령의 평균값을 국소평균연령(local mean age)이라 한다.

또한 실내 임의의 점으로부터 배기구까지 빠져나갈 때까지 소요된 시간을 잔여체류시간이라고 하는데 이것도 여러 가지 경로를 통한 입자들의 평균값으로서 국소평균 잔여체류시간(local mean residual life time)이라고 한다. 또한 국소평균연령과 국소평균 잔여체류시간의 합은 그 지점을 통과하는 공기입자의 실내체류시간(resident time)이 된다. 급기구를 통하여 태어난 공기입자가 현재의 위치까지 도달하는데 걸린 시간이 나이이며 현재의 위치로부터 배기구로 사망할 때까지 남은 시간이 여생이다. 또한 나이와 여생의 합은 수명으로 이해하면 될 것이다.

국소평균연령(LMA)이란 신선외기가 임의의 점

표 2 급기효율과 배기효율을 나타내기 위해 사용된 용어

|                                    | supply effectiveness     | exhaust effectiveness             |
|------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| Sandberg and Sjöberg <sup>6)</sup> | air diffusion efficiency | -                                 |
| Sandberg <sup>7)</sup>             | air exchange efficiency  | contaminant removal effectiveness |
| ASHRAE <sup>8)</sup>               | air change effectiveness | ventilation effectiveness         |
| AIVC <sup>9)</sup>                 | air change efficiency    | ventilation efficiency            |
| Murakami <sup>10)</sup>            | SVE3                     | SVE1=SVE6                         |

P까지 도달하는 시간을 의미하므로 급기의 실내분배 성능을 정량화하는데 사용될 수 있으며, 국소평균 잔여체류시간(LMR)이란 그 지점으로부터 배기되는데 소요되는 시간을 의미하므로 오염물이 배기되는 성능을 정량화하는데 이용될 수 있을 것이다.

또한 국소평균연령을 전체 실내공간에 대하여 평균값을 구하면 실평균연령(room mean age)이 된다. 마찬가지로 전체 실내공간에 대한 평균 국소

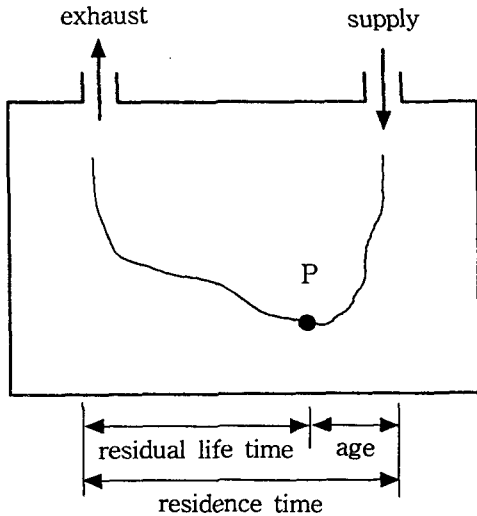


그림 1 연령과 잔여체류시간의 개념

잔여체류시간은 실평균 잔여체류시간(room mean residual life time)이 된다. 실평균연령은 실전체의 급기효율을 나타내고 실평균 잔여체류시간은 실전체의 배기효율을 나타낸다고 볼 수 있다.

#### 4.2 급기효율과 배기효율의 정의

환기효율을 나타내기 위하여 실내의 공기가 완전 혼합되어 위치에 관계없이 일정한 농도분포를 보이는 상태를 기준 상태로 생각된다. 완전혼합의 환기 상태에서 실내체적 V에 대한 시간당 환기량 Q를 환기횟수(air change rate) 또는 환기율(ventilation rate)이라고 한다. 환기율의 역수는 시간의 차원을 가지며 명목시간상수(nominal time constant)라고 한다.

$$\tau_n = V/Q \tag{1}$$

따라서 국소 급기효율과 국소 배기효율은 다음과 식과 같이 명목시간상수에 대한 국소평균연령이나 국소평균 잔여체류시간의 비율로서 정의한다. 국소급기효율 및 국소배기효율은 그 값이 100%이상 무한대로도 될 수 있기 때문에 효율이라는 용어보다는 국소급기지수 또는 국소배기지수라는 용어를 사용하는 것이 더욱 적합할 수도 있다.

$$\alpha_p = \tau_n / LMA_p \tag{2}$$

$$\epsilon_p = \tau_n / LMR_p \tag{3}$$

여기서 하첨자 P는 실내 임의의 점 P에서의 값을 의미한다. 또 배기구에서의 국소평균연령(LMA<sub>ex</sub>)은 급기구에서의 국소평균 잔여체류시간(LMR<sub>sup</sub>)과 동일한 것이며 이것은 명목시간상수와 같다는 것을 쉽게 증명할 수 있다.

$$LMA_{ex} = LMR_{sup} = \tau_n \tag{4}$$

따라서 국소급기효율이나 국소배기효율을 명목시간상수 대신에 LMA<sub>ex</sub>나 LMR<sub>sup</sub>를 이용하여 나타낼 수 있다. 그러면 국소급기효율은 배구에 대한 그 지점에서의 LMA의 비율이고 국소배기효율은 급구에 대한 그 지점에서의 LMR의 비율로 이해할 수 있을 것이다. 표 3에 급기효율과 배기효율의 상호대응적 개념이 요약되어 있다.

실평균 급기효율 또는 실평균 배기효율은 명목시간상수에 대한 실평균연령과 실평균 잔여체류시간에 대한 비율로서 정의한다.

$$\langle \alpha \rangle = \tau_n / \langle LMA \rangle \tag{5}$$

$$\langle \epsilon \rangle = \tau_n / \langle LMR \rangle \tag{6}$$

여기서 < > 는 전 실내 공간에 대한 평균값을 의미한다. 그런데 뒤에서 증명을 하겠지만, 실평균연령과 실평균 잔여체류시간은 동일하다. 따라서 실평균 급기효율과 실평균 배기효율의 출발점은 다르지만 동일한 값을 가지므로 실평균값에 대한 급기효율과 배기효율을 구별하여 표시하는 것은 무의미하다. 즉 실평균급기효율과 실평균배기효율은 어떠

표 3 평균연령과 평균잔여체류시간을 이용한 급기효율 및 배기효율

| supply effectiveness  | exhaust effectiveness   |
|---|---|
| age of air<br>LMA <sub>p</sub> = local mean age at P<br><LMA> = room mean age of air  | residual life time of air<br>LMR <sub>p</sub> = local mean residual life time at P<br><LMR> = room mean residual life time of air                                     |
| local supply index<br>: local air change eff.(ASHRAE)<br>$\alpha_p = \tau_n / LMA_p$<br>= LMA <sub>ex</sub> / LMA <sub>p</sub><br>= LMA at exhaust / LMA at P | local exhaust index<br>: contaminant removal eff.(Sandberg)<br>$\epsilon_p = \tau_n / LMR_p$<br>= LMR <sub>sup</sub> / LMR <sub>p</sub><br>= LMR at supply / LMR at P |
| room mean supply effectiveness<br>$\langle \alpha \rangle = \tau_n / \langle LMA \rangle$<br>= air change eff.(ASHRAE)  | room mean exhaust effectiveness<br>$\langle \epsilon \rangle = \tau_n / \langle LMR \rangle$<br>= ventilation eff.(Yaglou)  |

한 방법으로 구하든지 관계없이 이를 실험평균환기 효율이라고 명명할 수 있다.

완전혼합의 상태를 기준으로 하면 실험급기효율이나 배기효율이 100%가 넘는 경우가 발생할 수가 있기 때문에 변위환기를 기준으로 하여 위의 정의를 2로 나누어 정의하는 경우도 있다. 이 경우에는 완전혼합의 경우가 50%의 실험평균 환기효율을 보인다.

## 5. 급기효율과 배기효율을 구하는 방법

### 5.1 국소급기효율

위와 같이 정의된 급기효율이나 배기효율을 수치 해석적으로나 실험적으로 구하기 위해서는 연령이나 잔여체류시간을 구해야 하는데 이를 위해서는 추적가스를 주입한 후 시간에 따른 비정상 농도변화를 관측하여야 한다. 추적가스의 주입방법에 따라서 체승(step-up)방법, 체강(step-down)방법, 그리고 펄스(pulse)방법이 있다. 어떠한 오염주입 방법을 사용하더라도 동일한 결과를 얻을 수 있다. 각각의 주입방법에 따라서 연령이나 잔여체류시간의 계산을 위한 수식의 형태는 다르나 기본적인 개념은 동일하다. 여기서는 주로 체승방법을 이용하여 설명하고자 한다.

실내의 점 P에서의 국소평균연령을 구하기 위해서는 그림 2에서와 같이 급기구에 추적가스를 주입

하고 P점에서의 시간에 따른 농도변화를 측정하면 옆 그림과 같이 된다. 국소평균연령은 그림에서 빛 금친 면적을 정상상태 농도로 나눈 값에 해당하므로 다음의 식과 같이 구해진다. 또한 배기구에서의 국소평균연령은 마찬가지로 방법으로 다음과 같이 구해진다.

$$LMA_p = \int_0^{\infty} \left( 1 - \frac{C_p^{sup}(t)}{C_{\infty}} \right) dt \quad (7)$$

$$LMA_{ex} = \int_0^{\infty} \left( 1 - \frac{C_{ex}^{sup}(t)}{C_{\infty}} \right) dt \quad (8)$$

여기서 농도 C의 하첨자 P는 측정지점을 의미하며, 상첨자 sup는 오염물이 주입된 위치를 표시한다. 시간이 충분히 흐른 후의 정상상태농도 C<sub>∞</sub>는 실내 어느 점에서나 균일하게 된다. 따라서 국소급기효율, α<sub>p</sub>는 P점과 배기구에서 계산된 국소평균연령으로부터 구하면 된다.

$$\begin{aligned} \alpha_p &= \tau_n / LMA_p \\ &= LMA_{ex} / LMA_p \end{aligned} \quad (9)$$

또는 이미 참고문헌[14]에서 증명된 바와 같이 실내에 단위 체적당 균일오염원이 존재하도록 하였을 때, 실내의 정상상태 오염농도 분포는 LMA의 분포와 동일하다는 사실을 이용하는 방법도 생각할 수 있다.

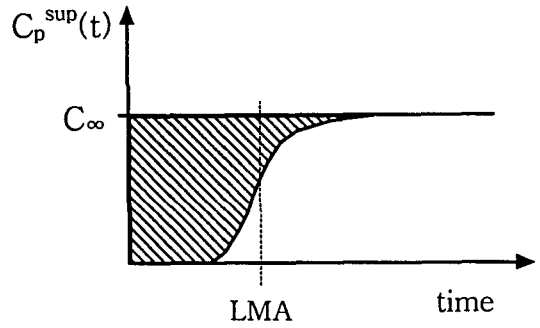
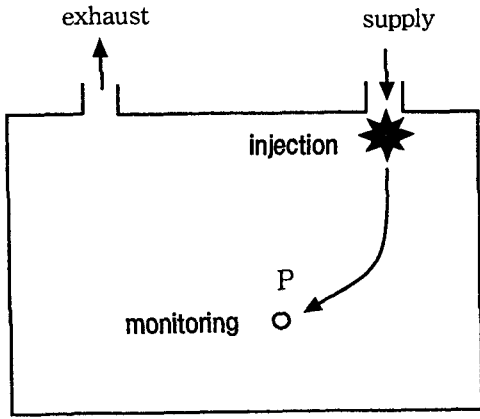


그림 2 국소평균연령을 구하기 위한 비정상농도 측정방법

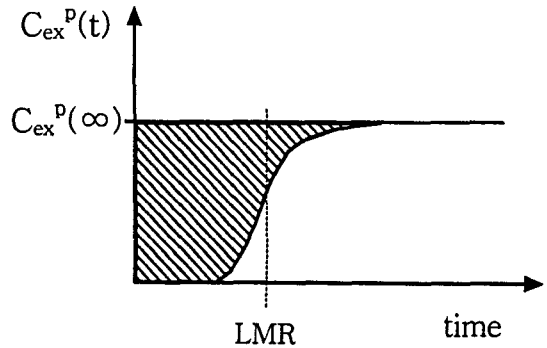
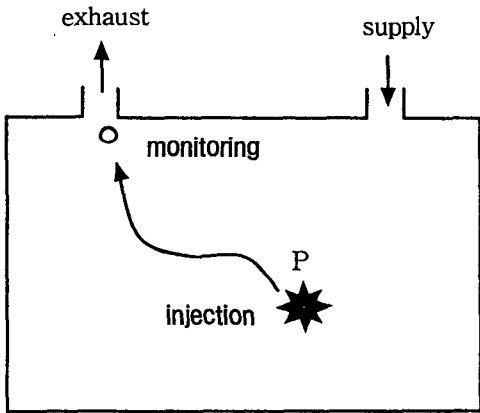


그림 3 국소평균 잔여체류시간을 구하기 위한 비정상농도 측정방법

$$LMA_p = \frac{\overline{C_p(\infty)}}{\dot{m}} \quad (10)$$

$$LMA_{ex} = \frac{\overline{C_{ex}(\infty)}}{\dot{m}} \quad (11)$$

여기서  $\dot{m}$ 은 단위체적당 균일 오염발생량이며 농도 C에 상첨자 대신 over-bar를 붙인 것은 실내 전구간에서의 균일오염발생을 의미하기 위함이다. 따라서 국소급기효율은 실내에 균일 오염발생이 있을 때 배기구와 P점에서의 정상상태 농도의 비로부터 구할 수 있다. 이것은 특히 수치해석적인 방법을 이용할 때 유용하다. 한번의 정상상태 농도분포의 해석결과로부터 실내의 모든 점의 국소급기효율의 분포를 구할 수 있기 때문이다.

$$\alpha_p = \frac{\overline{C_{ex}(\infty)}}{C_p(\infty)} \quad (12)$$

### 5.2 국소배기효율

마찬가지로 실내의 점 P에서의 국소평균 잔여체류시간을 구하기 위해서는 원래의 정의에 따라서 그림 3에서와 같이 원하는 지점 P에서 오염물질을 발생하기 시작하여 배기구에서의 농도를 측정함으로써 구할 수 있다.

$$LMR_p = \int_0^{\infty} \left( 1 - \frac{C_{ex}^p(t)}{C_{ex}^p(\infty)} \right) dt \quad (13)$$

여기서 농도 C의 하첨자 ex는 측정점이 배기구임을 의미하며, 오염발생지점 P가 구하고자 하는 지

점의 국소평균 잔여체류시간의 위치이다.  $C_{ex}^p(\infty)$ 는 정상상태 도달후 배기구에서의 농도로서  $\dot{M}/Q$ 이므로 이 식을 다시 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} LMR_p &= \frac{1}{\dot{M}} \int_0^{\infty} \dot{M} - QC_{ex}^p(t) dt \\ &= \frac{\langle C^p(\infty) \rangle V}{\dot{M}} \\ &= \frac{\langle C^p(\infty) \rangle \tau_n}{C_{ex}^p(\infty)} \end{aligned} \quad (14)$$

여기서  $\dot{M}$ 은 P지점에서의 시간당 오염발생량이다. 우변 적분내의 첫째항은 실내 총발생량을 의미하며, 둘째항은 배기구를 통한 오염물질의 배출량을 의미한다. 따라서 그 차이는 체승방법이 시작되어 정상상태에 도달한 후의 실내에 머물고 있는 오염보유량(hold-up)에 해당한다. 실내 오염보유량이란 실내에 존재하는 오염물질의 양으로서 실내평균농도에 실내체적을 곱한 것과 같다.

따라서 P점에서의 국소배기효율은 본래의 정의에 따라서 급기구와 P점에서의 LMR의 비율로서 이해할 수도 있고, 정상상태 도달후 배기구에서의 농도와 실내 평균농도의 비율로서 이해할 수도 있다.

$$\begin{aligned} \epsilon_p &= \tau_n / LMR_p \\ &= LMR_{sup} / LMR_p \\ &= \frac{C_{ex}^p(\infty)}{\langle C^p(\infty) \rangle} \end{aligned} \quad (15)$$

이러한 결과는 처음 Yaglou가 제안한 농도비에 의한 환기효율의 정의와도 일맥상통하고 있다. 그러나 그가 제안한 것은 오염발생 위치를 고려하지 않은 상태에서 단순히 실내농도와 배기농도를 비교하고 있다. 즉 오염 발생지점의 국소환기효율이 아니라 실전체의 환기효율로 이해하고 있는 것이다. Sandberg도 마찬가지로 위의 농도비를 실평균 오염제거효율(contaminant removal effectiveness)로 이해하였고, 이 개념을 연장하여 임의의 점 P에서의 농도와 배기구의 농도비를 국소 오염제거효율로 정의하고 있다.

그러나 이러한 정의는 배기효율에 있어서 국소값과 실내평균값에 대하여 혼란을 일으킬 소지가 있

다. 본고에서 제안하고자 하는 것은 위의 식에 표현된 농도비가 실평균이 아닌 국소 배기효율의 개념이라는 것이다. P점에서 오염이 발생되었을 때 그 지점에서 발생한 오염물질이 얼마나 잘 배기되는가 하는 것이 그 지점에서의 국소배기효율을 의미하며 실평균 배기효율이란 이러한 실내의 국소 배기효율을 실내 모든 점에서 구하여 이를 공간적으로 평균하여 구하여야 한다는 뜻이다. 오염원의 위치를 고려하지 않은 단순 농도비는 배기상태를 표시하는 배기효율을 나타내기에는 적합하지 못하다.

### 5.3 실평균 급기효율과 실평균 배기효율

전체 실내공간에 대한 실평균 급기효율을 구하기 위해서는 실평균연령을 구하여야 하는데 이는 앞에서 설명한 국소평균연령을 전 실내공간에 대하여 구하여야 한다. 즉 급기구에서 오염물질을 발생시키기 시작하여 실내 여러점에서 시간에 따른 농도곡선을 측정하여야 한다. 이것은 배기구에서의 농도곡선의 시간에 대한 1차 모멘트를 계산함으로써 구할 수도 있다.<sup>6)</sup> 즉 체승방식의 경우 실평균연령은 다음과 같이 표현된다.

$$\langle LMA \rangle = \frac{Q}{V} \int_0^{\infty} t \left( 1 - \frac{C_{ex}^{sup}(t)}{C_{\infty}} \right) dt \quad (16)$$

또한 앞에서 언급한 바와 같이 LMA의 분포는 실내에 균일 오염발생원  $m$ 이 존재할 때의 오염농도 분포와 동일하므로 실평균 연령은 균일 오염발생원이 존재할 때, 실내평균농도로부터 구할 수 있다. 따라서 실평균 급기효율은 표 4에서와 같이 실내 평균농도에 대한 배기구의 농도비로 구할 수 있다.

$$\langle LMA \rangle = \frac{\langle \bar{C}(\infty) \rangle}{m} \quad (17)$$

실평균 잔여체류시간을 구하기 위해서는 국소평균 잔여체류시간을 전 실내공간에 대하여 구하여야 한다. 여기서는 실평균연령의 측정방법과는 달리 측정위치를 배기구에 고정시키고 실내의 모든 점에서 오염물질을 동시에 발생시켜야 한다. 즉, 실내 여러 위치에서의 오염원이 중첩되어 있을 때의 배기구의 농도를 측정하여야 한다는 뜻이다. 따라서 실평균 배기효율은 실내 모든 점에 오염원을 중

표 4 국소 급배기효율과 실평균 급배기효율을 구하는 방법

|                         | supply effectiveness  | exhaust effectiveness   |
|-------------------------|---|---|
| local index             | $\alpha_p = \tau_n / LMA_p$ <p>1. by step-up generation at supply<br/>- transient C at P<br/>- transient C at exhaust</p> $\alpha_p = \frac{\tau_n}{\int_0^\infty \left(1 - \frac{C_p^{sup}(t)}{C_\infty}\right) dt}$ <p>where <math>\tau_n = \int_0^\infty \left(1 - \frac{C_p^{sup}(t)}{C_\infty}\right) dt</math></p> <p>2. by uniform generation in space<br/>- steady C at P<br/>- steady C at exhaust</p> $\alpha_p = \frac{\overline{C_{ex}(\infty)}}{\overline{C_p(\infty)}}$ | $\epsilon_p = \tau_n / LMR_p$ <p>1. by step-up generation at P<br/>- transient C at exhaust</p> $\epsilon_p = \frac{\tau_n}{\int_0^\infty \left(1 - \frac{C_{ex}^p(t)}{C_{ex}^p(\infty)}\right) dt}$ <p>where <math>\tau_n = V/Q</math></p> <p>2. by step-up generation at P<br/>- steady C at exhaust<br/>- steady room mean concentration</p> $\epsilon_p = \frac{C_{ex}^p(\infty)}{\langle C^p(\infty) \rangle}$ |
| room mean effectiveness | $\langle \alpha \rangle = \tau_n / \langle LMA \rangle$ <p>1. by step-up generation at supply<br/>- transient C at exhaust</p> $\langle \alpha \rangle = \frac{\tau_n}{\frac{Q}{V} \int_0^\infty t \left(1 - \frac{C_{ex}^{sup}(t)}{C_\infty}\right) dt}$ <p>2. by uniform generation in space<br/>- steady room average C<br/>- steady C at exhaust</p> $\langle \alpha \rangle = \frac{\overline{C_{ex}(\infty)}}{\langle \overline{C}(\infty) \rangle}$                            | $\langle \epsilon \rangle = \tau_n / \langle LMR \rangle$<br><br>$\langle \epsilon \rangle = \langle \alpha \rangle$  |

침시켜 놓고 실내 평균농도에 대한 배기구에서의 농도의 비를 의미하므로 앞에서 설명한 실평균연령을 구하는 개념과 동일하다. 따라서 실평균연령과 실평균 잔여체류시간은 같다는 것이 증명된 셈이다. 즉

$$\langle \epsilon \rangle = \langle \alpha \rangle \tag{18}$$

국소급기효율과 국소배기효율, 그리고 실평균급기효율과 실평균배기효율의 개념과 측정방법이 표 4에 요약되어 나타나 있다.



## 6. 맺음말

(1) 환기효율(ventilation effectiveness)은 급기효율(supply effectiveness)과 배기효율(exhaust effectiveness)로 나누어 생각한다. 급기효율은 신선급기가 실내로 적절히 공급 또는 분배되는가를 나타내는 지표이며, 배기효율은 실내에서 발생한 오염물질이 효과적으로 제거되는가를 나타내는 지표이다.

(2) 국소 급기효율(local supply index)은 명목시간수와 국소평균연령의 비로서 정의된다. 국소 급기효율은 급기구에 추적가스를 주입하였을 때, 실내 임의의 점에서 시간에 따른 농도곡선과 배기구에서의 농도곡선을 측정하여 구할 수 있다.

(3) 국소 배기효율(local exhaust index)은 명목시간상수와 국소평균 잔여체류시간의 비로서 정의된다. 국소배기효율은 그 지점에서 발생한 오염원에 대하여 정상상태의 실험군 농도와 배기구에서의 농도비로서 구할 수 있다.

(4) 실험군 급기효율과 실험군 배기효율은 동일한 값을 가지며 이것을 실험군 환기효율(room mean ventilation effectiveness 또는 air change effectiveness)이라고 한다. 실험군 환기효율은 급기구로부터 주입된 추적가스에 대하여 배기구에서의 농도곡선을 측정하여 시간에 대한 1차 모멘트값과 0차 모멘트값을 계산하여 구한다. 또는 실내에 균일하게 분포된 오염원으로부터 발생한 오염물질의 실내평균농도에 대한 배기구의 농도비로서 구할 수도 있다.

(5) 변위환기의 경우에 100%의 효율을 나타내기 위하여 여기서 정의한 실험군환기효율의 값을 2로 나누는 것으로 정의할 수도 있다. 이 경우 완전혼합상태의 실험군 환기효율이 50%가 된다.

## 참고 문헌

1. Yaglou, C. P. and Witheridge, W. N., 1937, "Ventilation Requirements", ASHVE Trans., Vol. 42, pp. 423~436.
2. Danckwerts, P. V., 1958, "Local Residence-Times in Continuous-Flow Systems", Chemical Engineering Science, Vol. 9, pp. 78~79.
3. Spalding, D. B., 1958, "A Note on Mean Residence-Times in Steady Flows of Arbitrary Complexity", Chemical Engineering Science, Vol. 9, pp. 74~77.
4. Sandberg, M., 1981, "What is Ventilation Efficiency", Building and Environment, Vol. 16, No. 2, pp. 123~135.
5. Sandberg, M., 1983, "Ventilation Efficiency as a Guide to Design", ASHRAE Trans., Vol. 89, Pt. 2B, pp. 455~479.
6. Sandberg, M. and Sjöberg, M., 1983, "The Use of Moments for Assessing Air Quality in Ventilated Rooms", Building and Environment, Vol. 18, No. 4, pp. 181~197.
7. Sandberg, M., 1992, "Ventilation Effectiveness and Purging Flow Rate-A Review", Proc. of International Symp. on Room Air Convection and Ventilation Effectiveness, pp. 17~27.
8. ASHRAE, 1997, "ASHRAE Handbook-Fundamentals", American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers.
9. AIVC, "A Guide to a Air Change Efficiency", Technical Note AIVC28, Air Infiltration and Ventilation Centre.
10. Murakami, S., 1992, "New Scales for Ventilation Efficiency and Their Application Based on Numerical Simulation of Room Airflow", Proc. of International Symp. on Room Air Convection and Ventilation Effectiveness, pp. 29~40.
11. Kato, S. and Murakami, S., 1988, "New Ventilation Efficiency Scales based on Spatial Distribution of Contaminant Concentration aided by Numerical Simulation", ASHRAE Trans., Vol. 94, No. 2, pp. 309~330.

12. Drivas, P. J., Simmonds, P. G., and Shair, F. H., 1972, "Experimental Characterization of Ventilation Systems in Buildings", *Envir. Sci. Technol.*, Vol. 6, No. 7.
13. Kusuda, T., 1976, "Control of Ventilation to Conserve Energy while Maintaining Acceptable Indoor Air Quality", *ASHRAE Trans.*, Vol. 82, Part 1, p. 1169.
14. Han, H., 1992, "Calculation of Ventilation Effectiveness Using Steady-State Concentration Distributions and Turbulent Airflow Patterns in a Half Scale Office Building", *Proc. of International Symp. on Room Air Convection and Ventilation Effectiveness*, pp. 187~191.