

실내공기질 평가를 위한 2구획 모델의 개발

조석호¹, 정성욱, 정징운, 김민수, 박홍재,
¹지산전문대학 산업위생과, 인제대학교 환경학과

1. 서론

많은 사람들이 하루 중 대부분의 시간을 보내고 있는 실내환경은 에너지 절감률을 높이기 위해 점차 밀폐화되고 있으며, 그로인해 실내 환경오염이 가속화되어 실내 거주자의 건강에 각종 위해요인으로 작용하고 있다. 1970년대에 들어서면서 구미 각국에서는 건강문제와 관련하여 실내공기질의 중요성이 새롭게 인식되기 시작하였으며, 그 후 실내공기질 모델(IAQM)이 많은 연구자들의 관심의 대상이 되어 왔다. 그러나, 이들 연구의 대부분은 실내 오염농도가 균일분포형상을 나타낸다는 가정하에 만들어진 완전혼합실 모델에 기초하고 있으며, 불완전혼합의 경우에도 혼합계수의 개념을 완전혼합실 모델에 도입하여 해석하고 있으므로 부적절한 면이 많았다.

따라서, 본 연구에서는 불완전혼합실에서의 실내공기질 평가를 위한 이론적 예측기법의 필요성에 따라 2구획 모델(two-zone model)에 관한 컴퓨터 프로그램을 개발하고, 이 모델에 의해 오염농도를 예측하고 평가하는 방법을 제시한다. 이 때, 프로그램 개발에는 WINDOWS 환경에서 사용 가능한 VISUAL BASIC 언어를 사용한다.

2. 2구획모델 이론

Fig. 1과 같이 하나의 불완전혼합실을 공기와 오염물질이 비교적 잘 혼합되어 있다고 생각되는 2개의 구획, 즉 하부구획(구획1)과 상부구획(구획2)으로 나누고, 구획 사이에서 공기의 재순환을 설명하는 수단으로 공기교환계수의 개념을 도입한다. 이러한 기본적인 가정에 의해 각 구획에 대한 질량평형방정식을 유도하면 다음 식과 같다.

$$V_1(dC_1/dt) = S_1 + Q_{in1}C_{s1} + Q_{i1}C_a + \beta_{21}C_2 - \beta_{12}C_1 - Q_{out1}C_1 - Q_{e1}C_1 - R_1 \quad (1)$$

$$V_2(dC_2/dt) = S_2 + Q_{in2}C_{s2} + Q_{i2}C_a + \beta_{12}C_1 - \beta_{21}C_2 - Q_{out2}C_2 - Q_{e2}C_2 - R_2 \quad (2)$$

또한, 각 구획에 대해, 유입 및 유출 환기량과 누입 및 누출환기량을 설명하기 위해 실내 총환기량 Q에 대한 환기비율을 나타내는 인자 $x_1, x_2, y_1, y_2, i_1,$

i_2, e_1, e_2 를 도입하며, 각 구획의 체적비율을 h_1, h_2 , 총오염발생량에 대한 각 구획의 발생비율을 g_1, g_2 , 각 구획사이의 공기교환계수를 f_1, f_2 라 하고, 오염물질의 실내 침착률을 K 라 하여 식(1)과 (2)를 정리하면 다음 식과 같다.

$$h_1V(dC_1/dt) = g_1S + x_1QC_{s1} + i_1QC_a - \{(f_1 + y_1 + e_1)Q + Kh_1V\}C_1 + f_2QC_2 \quad (3)$$

$$h_2V(dC_2/dt) = g_2S + x_2QC_{s2} + i_2QC_a + f_1QC_1 - \{(f_2 + y_2 + e_2)Q + Kh_2V\}C_2 \quad (4)$$

한편, 실내의 환기횟수 N 은

$$N = Q/V \quad (5)$$

로 정의되며, 식(3)과 (4)를 단순화하기 위해 $h_1 = h, g_1 = g, f_1 = f$ 라 하면, $h_2 = 1 - h, g_2 = 1 - g, f_2 = f + x_2 + i_2 - y_2 - e_2$ 가 된다.

따라서, 식(3)과 (4)는 다음과 같은 1계 미분방정식으로 표시할 수 있다.

$$dC_1/dt = a_{10} + a_{11}C_1 + a_{12}C_2 \quad (6)$$

$$dC_2/dt = a_{20} + a_{21}C_1 + a_{22}C_2 \quad (7)$$

여기서, 각 상수인자들은 다음과 같다.

$$a_{10} = (N/h) (x_1C_{s1} + i_1C_a + gS/Q) \quad (8)$$

$$a_{11} = -(N/h) (f + y_1 + e_1) - K \quad (9)$$

$$a_{12} = (N/h) (f + x_2 + i_2 - y_2 - e_2) \quad (10)$$

$$a_{20} = \{N/(1 - h)\} \{x_2C_{s2} + i_2C_a + (1 - g)S/Q\} \quad (11)$$

$$a_{21} = (Nf)/(1 - h) \quad (12)$$

$$a_{22} = -(N/(1 - h)) (f + x_2 + i_2) - K \quad (13)$$

식(6)과 (7)의 일반해는 다음과 같다.

$$C_1(t) = P_1\exp(N\sigma_1t) + P_2\exp(N\sigma_2t) + C_1(\infty) \quad (14)$$

$$C_2(t) = MP_1\exp(N\sigma_1t) + LP_2\exp(N\sigma_2t) + C_2(\infty) \quad (15)$$

이들 식에서 $C_1(\infty), C_2(\infty)$ 는 각 구획에서의 정상상태 농도로서

$$C_1(\infty) = (a_{10}a_{22} - a_{20}a_{12})/(a_{12}a_{21} - a_{11}a_{22}) \quad (16)$$

$$C_2(\infty) = (a_{20}a_{11} - a_{10}a_{21})/(a_{12}a_{21} - a_{11}a_{22}) \quad (17)$$

이다. σ_1, σ_2 와 M, L 은 다음과 같다.

$$\sigma_1 = [(a_{11} + a_{22}) + \{(a_{11} - a_{22})^2 + 4a_{12}a_{21}\}^{1/2}]/(2N) \quad (18)$$

$$\sigma_2 = [(a_{11} + a_{22}) - \{(a_{11} - a_{22})^2 + 4a_{12}a_{21}\}^{1/2}]/(2N) \quad (19)$$

$$M = (N\sigma_1 - a_{11})/a_{12} \quad (20)$$

$$L = (N\sigma_2 - a_{11})/a_{12} \quad (21)$$

또한, 각 구획의 초기농도를 $C_1(0), C_2(0)$ 라 하고, I_1 과 I_2 를 초기농도와 정상상태 농도와의 차라고 하면,

$$I_1 = C_1(0) - C_1(\infty) \quad (22)$$

$$I_2 = C_2(0) - C_2(\infty) \quad (23)$$

이며, P_1 과 P_2 는 다음 식과 같다.

$$P_1 = \{L - (I_2/I_1)\} \{I_1/(L - M)\} \quad (24)$$

$$P_2 = \{(I_2/I_1) - M\} \{I_1/(L - M)\} \quad (25)$$

이상과 같이 각 구획에서의 오염농도가 구해지면, 전체 실내에 대한 평균농도 $C_e(t)$ 는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$C_e(t) = hC_1(t) + (1 - h) C_2(t) \quad (26)$$

3. 결과 및 고찰

하나의 예로서, 본 연구에서 개발된 2구획 모델을 폐포침착성 입자(Respirable particles, RP)가 발생하는 임의의 실내공간에서의 공기질을 예측하는 데 적용하였다. 이 실내공간의 환기 및 발생원 데이터는 Table 1과 같은 것으로 하였으며, 실내농도 계산에는 Table 2와 같은 입력변수 데이터를 사용하였다. 이 때, 그 계산 결과는 다음과 같다.

공기교환계수(f)가 1인 경우의 시간경과에 따른 실내 RP농도를 나타낸 것이다. 오전 9시에서 정오까지 농도가 증가하다가 오후 1시까지 다소 감소하며, 다시 오후 5시까지 증가하여 피크치를 나타내고, 이후에는 다시 감소하여 외기농도보다 약간 낮아지는 경향을 보이고 있다.

공기교환계수가 15인 경우에는 공기변환계수가 1인 경우와 유사한 경향을 보이고 있으나 공기교환계수가 1인 경우에 비해, 구획1과 구획2의 농도가 상당히 접근하고 있다. 이것은 공기교환계수의 값이 커질수록 구획1에서 구획2로의 공기교환이 활발해지고 그로 인해 혼합도 증가되는 것에 기인한 것이라 생각된다.

또한 공기교환계수의 값이 증가함에 따라 구획1의 피크농도와 시간평균농도는 근소하게 감소하며, 구획2의 피크 및 평균농도는 급격하게 증가하는 경향을 보이고 있다. 그래서 공기교환계수가 15이상이면 구획 사이의 농도차는 매우 작아져 완전혼합실에 거의 근접하게 됨을 알 수 있다.

그리고 구획1의 체적비율이 증가함에 따라 구획1의 농도는 감소하고 구획2의 농도는 대체로 증가하는 경향을 보이거나, 그 값의 변화는 그다지 크지 않음을 알 수 있다.

따라서, 체적비율이 구획 농도에 미치는 영향은 공기교환계수에 비해 크지 않으므로, 2구획모델을 이용한 실내공기질의 정확한 예측은 공기교환계수의 선택에 좌우됨을 알 수 있으며, 그 값은 대략 0~15의 범위에 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서 개발된 2구획 모델을 적절히 활용하므로써 직접 측정하지 않고도 불완전하게 혼합되는 여러 실내환경의 오염농도를 예측하고 평가하는 것이 가능할 것이다. 이 때 가장 어려운 문제는 공기교환계수의 선택에 있다. 그러나

공기교환계수가 0일 때는 구획1과 구획2가 서로 독립되어 있음을 의미하며, 값이 증가함에 따라 공기교환으로 인한 혼합이 활발해져 15이상이면 전 실내공간은 완전혼합실에 접근함을 알 수 있다. 그러므로, 공기교환계수는 0과 15사이의 여러 값들을 사용하여 그에 따른 농도를 평가하는 방법이 사용된다. 그리고, 본 연구결과는 실내환경 개선을 위한 설계 및 환기계획 등을 수립하는 데 도움이 될 것이다. 또한, 2구획 모델에 관한 이론적인 바탕은 다구획 모델로의 확장을 가능하게 할 것이며, 이것은 백화점, 아트리에 빌딩, 공항 터미널, 실내 경기장과 같은 대형 밀폐환경의 공기질을 예측하고 평가하는 데 크게 기여할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- 1) Wadden, R. A. and P.A. Scheff,1983, Indoor air pollution, John Wiley & Sons, Inc., 105-132.
- 2) Shair, F. H. and K.L. Heitner,1974, Theoretical model for relating indoor polutand concentrations to those outside, Environ, Sci.Tech., 8, 441-451.
- 3) Sparks, L. E., 1988, Indoor air quality model version 1.0, EPA-600/8-88-097a, 1-97.
- 4) Tichenor, B. A., L.A. Sparks, J.B. White and M.D. Jackson, 1990, Evaluating sources of indoor air pollution., J. Air Waste Manage. Assoc., 40, 487-492.
- 5) Hayes, S. R., 1991, Use of an indoor air quality model(IAQM) to estimate indoor ozone levels., J. Air Waste Manage. Assoc., 41, 161-170.
- 6) Jayjock, M. A. and N.C. Hawkins, 1995, Exposure database improvements for indoor air model validation., Appl. Occup. Environ. Hyg., 10(4), 379-382.
- 7) Skaret, E., 1986, Ventilation by displacement - characterization and design implications.,Ventilation'85, 827-841.
- 8) Heinsohn, R. J., 1991, Industrial ventilation:Engineering principles, John Wiley & Sons, Inc., 228-293.
- 9) Nicas, M., 1996, Estimating exposure intensity in an imperfectly mixed room., AIHA J., 57, 542-550.

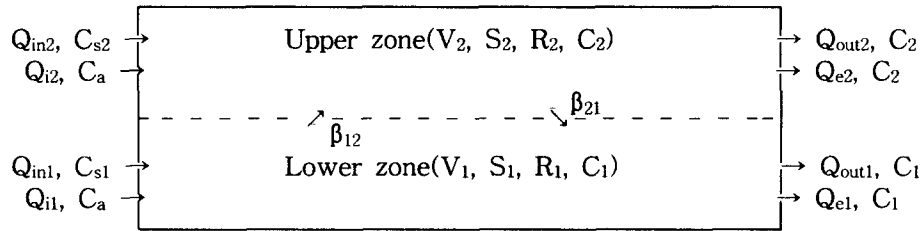


Fig. 1. The two-zone model.

Table 1. Room ventilation and source data

Room volume(V)	250m ³
Ventilation rate(Q)	645m ³ /hr
Periods when RP is generated	9:00 a.m. - noon 1:00 - 5:00 p.m.
RP generating rate(S)	410mg/hr
Deposition rate(K)	0.05h ⁻¹
Outdoor air concentration(C _a)	0.05mg/m ³

Table 2. Input data

Parameters	Data	Parameters	Data
V	Table 1	h	0.9, 0.6,
Q	Table 1		0.5, 0.4,
S	Table 1		0.1
K	Table 1	f	0.5, 1, 5,
x ₁	0		10, 15,
x ₂	0.81		20
i ₁	0	C _a	Table 1
i ₂	0.19	C _{s1}	C _a
y ₁	1.0	C _{s2}	C _a
y ₂	0	C ₁ (0)	C _a
e ₁	0		C ₁ (t _f)*
e ₂	0	C ₂ (0)	C _a
g	1.0		C ₂ (t _f)*

* t_f ; final time of previous period