

다구획 작업환경에서의 오염농도 예측을 위한 이론적 모델의 개발

Development of a Theoretical Model for Predicting Contaminant Concentrations in a Multi-zone Work Environment

조석호*

Seok-Ho Cho*

부산가톨릭대학교 환경행정학과

Department of Environmental Administration, Catholic University of Pusan

ABSTRACT

To predict contaminant concentrations within a multi-zone work environment, an air quality model in the work environment was developed. To do this, airflow equations on the basis of orifice equation were solved by using the Conte and De Boor scheme, and then equations for the conservation of mass on contaminant were solved by using the fourth-order Runge-Kutta algorithm. To validate the accuracy of simulated results, this model was applied to the controlled environment chamber that had been tested in 1998 by Chung KC. The comparison of predicted concentrations by this study with measured concentrations by the Chung KC indicated that the average deviations were 2.66, 3.35, and 3.15% for zone 1, zone 2, and zone 3, respectively. Also, this model was applied to a working plant with four zones. Thus, the results of contaminant concentration versus time were predicted according to the schedule of the openings operation, and case studies were done for four cases of the openings operation to investigate the interaction of airflow and contaminant concentration. The results indicated that opening operation schedules had a significant effect on contaminant removal efficiency. Therefore, this model might be able to apply for the design of ventilation schedules to control contaminants optimally.

Key words : Multi-zone work environment, Air quality model, Contaminant removal efficiency

I. 서 론

산업현장에서 발생하는 각종 유해요인 중에서 화학적 유해요인을 관리하여 근로자의 건강을 보호하기 위해서는 작업장의 공기질에 대한 실태를 파악하여 적절한 예방 및 대책을 세워 작업환경을 쾌적한 상태로 유지해야 한다. 이처럼 작업환경 공기질의 실태 파악에는 우선적으로 작업환경을 직접 측정하는 것이 무엇보다도 중요하다. 하지만 측정에는 시간적으로나 공간적 또는 경제적으로 많은 제약이 따른다. 그래서 작업장에서 발생하는 유해 물질의 농도를 예측하기 위한 이론적 모델링 기법에 관한 연구가 필요하며, 특히 신설 공장의 경우에는 설계단계에서부터 공정의 배치 및 환기 계획을 반영하기 위해서는

작업환경 공기질 모델의 연구가 필수적이다.

아파트, 사무실 등의 일반적인 실내환경의 공기질을 예측하고 평가하기 위한 실내공기질 모델(Indoor Air Quality Model, IAQM)은 Shair와 Heitner(1974)가 실내농도를 실외농도와 관련시킨 이론적 모델을 제시한 후 많은 연구자들의 관심의 대상이 되어 왔다(Walton, 1982; Walton, 1984; Walton, 1989; Waters와 Simons,1987). 실내 공기질 모델은 단일구획, 2구획, 다구획 등으로 그 대상 공간이 확장되어 왔으며, 실내환경의 주요 인자인 온도, 공기유동, 습도, 오염농도 등을 개별적으로 예측하기 위한 연구로부터 이들 인자들의 상호작용을 모두 고려하여 이들을 동시에 예측하기 위한 연구로 확장되어 왔다(Chung,1996; Zhang,2005). 국내에서도 온도, 공기유동, 습도, 오염농도를 동시에 예측하기 위한 다구획 모델의 개발과 환경인자의 민감도 분석에 관한 연구결과가 발표되었다(조석호,2006; 조석호, 2010). 이와 같이 일반적인 실내환경에서의 공기유동과 오염농도를 예측하기 위한 이론적인 모델에 관한 연구 결과는 다수 발표되어 왔다.

작업환경 공기질 모델과 관련된 연구에 관해서는 Mark (1996)가 불완전 혼합실을 2구획(상, 하)으로 구분하여

*Corresponding author: Seok-Ho Cho

부산광역시 금정구 부곡3동 9번지

부산가톨릭대학교 환경행정학과

Tel: 051-510-0631, Fax: 051-510-0626

E-mail: shcho@cup.ac.kr

* 본 연구는 부산가톨릭대학교 2010학년도 학술연구비 지원으로 수행되었음.

Received: 2011. 7. 19., Revised: 2011. 9. 27.

Accepted: 2011. 12. 19.

공기교환계수의 개념을 도입함으로써 오염농도를 이론적으로 예측하는 모델을 제시하였으며, Chung (1998)은 구획된 작업환경 내에서 오염물질의 제거 효과를 평가하기 위한 이론적 모델을 개발하고, 이 모델을 임의의 작업장에 적용하여 각 구획의 상대농도를 예측한 연구결과를 발표하였다. 이처럼 작업환경 내의 공기오염을 예측하기 위한 몇몇 모델에 관한 연구결과가 발표되고 있으나, 일반적인 실내환경 공기질 모델 연구에 비해 매우 미흡한 실정이며, 국내에서는 연구결과가 거의 발표되고 있지 않는 실정이다.

작업환경의 공기질도 일반적인 실내환경과 마찬가지로 온도, 공기유동, 습도, 오염농도 등의 인자들이 상호간에 영향을 주고받고 있다. 작업환경에서 가장 큰 관심의 대상인 오염농도는 습도에는 전혀 영향을 받지 않고 온도에는 조금 영향을 받으나 공기유동에는 매우 민감하게 작용하게 된다. 따라서 본 연구에서는 공기유동과 오염농도만을 관련시킨 작업환경 공기질 모델을 제시하고자 한다. 또한, 대부분의 작업장은 그 내부공간이 문이나 개구들에 의해 연결되지만, 물리적으로 분리된 다구획으로 이루어져 있다. 그리고 작업환경은 일반적인 실내환경의 경우에 비해 각 구획 사이의 농도분포가 더 불균일하다. 이러한 작업환경 특성을 고려하여 본 연구에서는 여러 구획으로 나누어진 작업환경에 대해 공기유동량과 오염농도를 예측하기 위한 모델을 개발하고, 본 모델을 Chung (1998)이 이론적 모델의 검증에 사용한 환경챔버에 적용하여 결과치를 서로 비교해 보며, 또한 산업현장 적용의 예로서 본 모델을 임의의 작업장에 적용하여 환기 제어에 따른 각 구획에서의 오염물질의 제거 효과를 평가하고자 한다. 이때 작업장에서 발생하는 오염물질은 요소계와 폐놀계의 합성수지 제조, 피혁 제조, 석유산업, 금속산업 등에서 많이 사용되며 발암물질(1A)로 알려져 있는 포름알데히드로 가정하였다.

II. 연구 방법

1. 다구획 작업환경 공기질 모델의 이론적 해석

1) 공기유동량 계산

여러 구획으로 나누어진 작업환경의 오염농도를 예측하기 위해서는 먼저 인접 구획 사이의 공기유동량이 정량화되어야 한다. 구획 사이의 통로를 흐르는 공기유동은 바람 및 온도차(밀도차)와 기계환기에 의해 야기되는 압력차에 의해 일어난다. 만약 구획 j에서 구획 k로 공기가 유동한다면, 그 구획 사이에 있는 유동통로에서의 압력차는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta P_{jk} = (P_j - P_k) + \rho_j g (Z_j - Z_{jk}) - \rho_k g (Z_k - Z_{kj}) + 0.5 C_p \rho_o V_o^2 \tag{1}$$

단, ΔP_{jk} : 유동통로에서의 압력차[Pa]

P_j, P_k : 각 구획의 기준높이에서의 압력[Pa]

Z_j, Z_k : 각 구획의 기준높이[m]

Z_{jk}, Z_{kj} : 유동통로의 중심높이[m]

ρ_j, ρ_k : 각 구획의 공기밀도[kg/m³]

ρ_o : 바람의 밀도[kg/m³]

g : 중력가속도[m/s²]

V_o : 풍속[m/s]

C_p' : 유동통로의 표면압력계수(실내구획 간의 개구에서는 0)

- 하첨자 -

k, j : 구획 번호

한편, 유동통로에서의 질량유량은 경험식과 오리피스 방정식을 토대로 구한 다음 식이 잘 알려져 있다(Ohira 등, 1993).

$$M_{jk} = CA'_{jk} (2\rho_j)^{1/2} \Delta P_{jk}^X \tag{2}$$

단, M_{jk} : 유동통로의 질량유량[kg/s]

C : 유동계수(통상적으로 0.6, 큰 개구 0.78)

X : 유동지수(작은 개구 0.65, 큰 개구 0.5)

A'_{jk} : 유동통로의 단면적[m²]

각 구획에서 질량보존을 만족하기 위해서는 유동통로를 통과하는 질량유량의 합이 영($\Sigma M_{jk} = 0$)이어야 하며, 이 조건을 만족하는 각 구획 내의 압력에 대한 적절한 조합을 찾기 위해서는 비선형 연립방정식을 풀어야 한다. 이를 위해 각 구획의 압력을 연속적으로 근사화하는 반복기법을 사용함으로써 질량유량을 구할 수 있다.

2) 오염농도 계산

일반적으로 작업환경의 공기질은 오염물질 발생량, 대기오염 및 기상 상태, 오염물질 소실량, 환기조건 등의 요인에 좌우되며, 작업장 내의 오염물질은 질량평형 방정식을 만족해야 한다. 즉 작업장 내에서의 오염물질의 축적량은 유입량과 발생량을 합한 것과 유출량과 소실량을 합한 것과의 차로 나타낼 수 있다. 이것을 구획 k에 대해 식으로 나타내면 다음과 같은 오염물질 질량평형 방정식을 얻을 수 있다.

$$V_k \frac{dC_k}{dt} = Q_{s_k} C_{s_k} + \sum_{j=1, j \neq k}^n K_j Q_{jk} C_j - (Q_{e_k} + \sum_{j=1, j \neq k}^n K_j Q_{kj}) C_k + G p_k - R p_k \tag{3}$$

단, C_k, C_j : 구획의 오염농도[mg/m³ 또는 ppm]

C_{s_k} : 급기농도[mg/m³ 또는 ppm]

Q_{s_k} : 급기량[m³/s]

Q_{e_k} : 배기량[m³/s]

Q_{jk} : 누입량[m³/s]

- Q_{kj} : 누출량[m³/s]
- Gp_k : 오염물질 발생량[mg/s 또는 m³/s]
- Rp_k : 오염물질 소실량(국소배기에 의한 제거량 포함)[mg/s 또는 m³/s]
- K_j : 혼합계수(0.3 ~ 1.0)
- V_k : 구획의 체적[m³]
- t : 시간[s]

오염물질 질량평형방정식은 각 구획에서의 오염농도 예측을 위한 연립미분방정식으로 나타나며, 이 선형 연립방정식을 각 시간 간격에서 동시에 풀게 되면 각 구획의 오염농도를 구할 수 있다.

2. 모델의 전산화

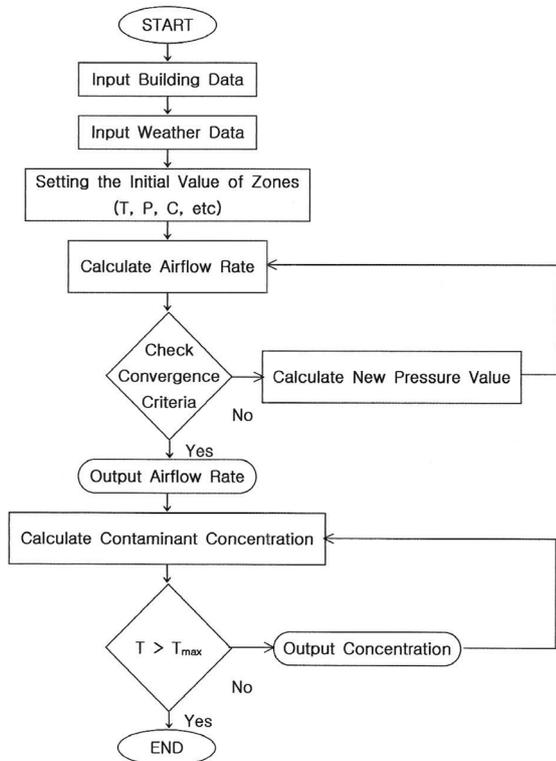


Fig. 1. Flowchart for predicting work environments

먼저 예측에 필요한 특정 작업장의 물리적인 형상에 대한 자료, 예측 시간대의 기상 자료(외기온도, 풍향 및 풍속, 대기압, 외기농도), 개구(창문, 문, 유동통로, 팬 등)의 운전 자료, 각 구획의 오염물질 발생량 및 소실량(국소배기에 의한 제거량 포함) 자료 등을 입력하며, 각 구획의 초기압력, 초기농도, 혼합계수 등을 설정한다. 그리고 나서 바람, 온도차, 기계환기 등에 의해 야기되는 압력차가 계산되고, 이 압력차에 의해 개구의 공기유동량이 계산된다. 이 때 각 구획의 온도는 알고 있는 것으로 한다. 각 구획에서의 질량보존을 만족하게 되는 압력의 적절한 조합을 찾기 위해서는 비선형 연립방정식을 풀어야 하는데, 이때 Conte와 De Boor 기법(Conte 등, 1972 ; Walton, 1982)이

사용되며, 수렴조건($|\Sigma M_{jk}| / \Sigma |M_{jk}| < 10^{-6}$)이 만족될 때까지 공기유동 계산 과정이 반복된다. 여기서 구해진 질량유량은 체적유량으로 환산되며, 예측된 체적유량을 이용하여 주어진 시간 간격에서 각 구획의 오염농도를 계산한다. 이때 오염물질에 대한 질량평형방정식은 연립 미분방정식의 형태로서 4계 Runge-Kutta 수치적 알고리즘(Carnahan 등, 1969)을 사용하면 쉽게 풀려지게 된다. 이러한 연속된 과정을 통해 각 개구에서의 공기유동량과 각 구획의 오염농도를 예측하여 출력하게 되는 데, 그 유동도는 Fig. 1과 같다. 이러한 전 과정은 VISUAL BASIC 언어를 사용하여 전산 프로그램이 작성되었다.

3. 환경챔버 적용을 위한 입력자료

본 모델의 검증을 위해 Chung(1998)이 시뮬레이션 연구의 검증에 사용한 Fig. 2와 같은 환경챔버의 자료 및 실험조건을 동일하게 적용하여 결과치를 서로 비교하였다. 즉, 2.5m 높이의 환경챔버는 3개의 작은 구획으로 나누어지고, 구획 2와 구획 3 사이에는 개방된 벽(2.1m × 1.6m)이 설치되어 있으며, 구획 1과 구획 3 사이에는 밀폐된 벽에 문(0.5m × 1.5m)이 설치되어 있는 구조이다. 구획 1의 급기팬(F1)은 2.32 m³/min의 신선한 외기를 구획 1로 공급하고, 구획 2와 구획 3의 배기팬(F2와 F3)은 각각 1.16 m³/min의 실내 오염공기를 배기한다. Chung은 추적가스 실험에 의해 챔버의 오염농도 분포를 측정하였는데, 이때 사용한 추적가스는 CO₂로서 신선한 공기 중의 농도는 300 ppm, 챔버 속의 초기농도는 1500 ppm으로 하였다.

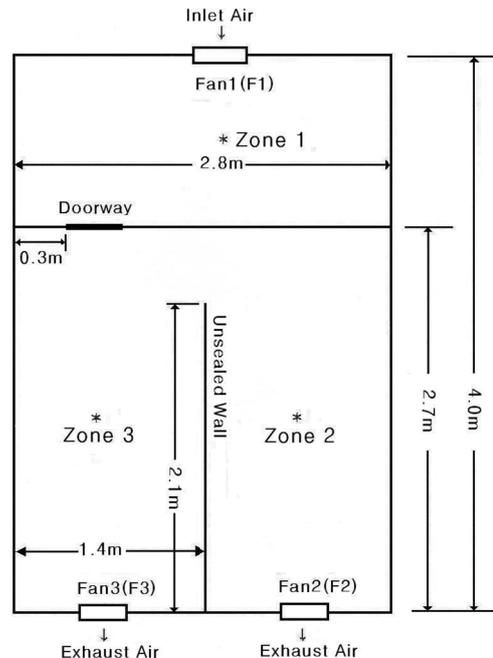


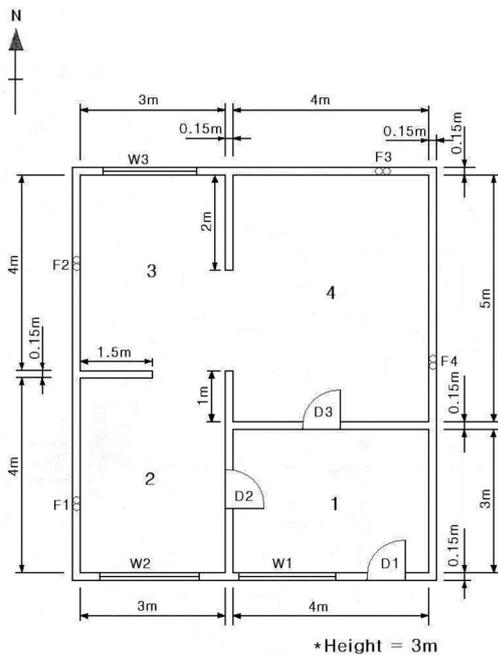
Fig. 2. Schematic of the controlled environment chamber

4. 산업현장 적용을 위한 입력자료

실제적인 산업현장에서의 적용에 앞서 Fig. 3과 같은 4구획

공간을 가진 임의의 작업장에 대해 본 모델을 적용하였으며, 시뮬레이션에 필요한 구획의 체적과 개구의 크기 및 중심높이는 Table 1과 같다. 예측 시간대의 외기온도는 21℃이고, 대기압은 101.3 kPa, 바람은 1 m/s의 속도로 남풍이 불고 있는 것으로 하였다. 그리고 이 작업장의 환기 스케줄은 Table 2에 나타내었다. 작업장 내에 기초환기용으로 설치된 4개의 송풍기(F1, F2, F3, F4)는 모두 각각 3 m³/min의 공기를 배기하고 있다. 본 시뮬레이션 연구에 사용한 오염물질은 실내 소실량이 없는 포름알데히드로서 외기농도는 0 mg/m³, 각 구획의 초기농도는 우리나라 고용노동부(고시 제 2011-13호)에서 정한 노출기준(TWA)인 0.75 mg/m³보다 약간 높은 1 mg/m³으로 가정하였다. 구획 1에서는 오염물질이 발생하지 않으며, 구획 2와 구획 3 및 구획 4에서 각각 0.1 mg/s, 0.2 mg/s, 0.4 mg/s씩 발생하였고, 12~13시와 16~17시에는 모든 구획에서 발생이 중지되는 것으로 하였다.

Table 2에 나타난 문의 개폐에 따른 환기계획은 4가지 경우로 구분할 수 있으며, 환기 스케줄에 따른 각 구획에



D1 : door 1, D2 : door 2, D3 : door 3
 W1 : window, W2 : window 2, W3 : window 3
 F1 : fan 1, F2 : fan 2, F3 : fan 3

Fig. 3. Arrangement of the simulated working plant

Table 1. Zone and opening data of the simulated working plant

Zone	Volume[m ³]	Opening	Area[m ²]	Center height[m]
1	36	D1, D2, D3*	1.6	1
2	36	W1, W2, W3**	2.8	2.3
3	36	OP23***	6	1.5
4	60	OP34****	4.5	2.5

* D1 : door 1, D2 : door 2, D3 : door 3

** W1 : window, W2 : window 2, W3 : window 3

*** OP23 : Flow path between zone 2 and zone 3

**** OP34 : Flow path between zone 3 and zone 4

Table 2. Schedule of the openings operation

Door*	Open hour									
	08~09	09~10	10~11	11~12	12~13	13~14	14~15	15~16	16~17	
D1	Closed	Closed	Closed	Open	Closed	Closed	Closed	Open	Closed	
D2	Open	Closed	Closed	Closed	Open	Open	Open	Closed	Open	
D3	Open	Open	Open	Closed	Open	Closed	Closed	Closed	Open	

* D1: door 1, D2: door 2, D3: door 3

대한 환기 효과를 더 자세히 조사하기 위해 Table 3에 나타난 경우에 대해 모의 테스트를 수행하였다. 이때 모든 구획에 대해 포름알데히드의 초기농도는 극단적으로 높은, 즉 급성중독을 일으킬 수 있는 농도인 100 mg/m³으로 가정하였으며, 오염물질의 발생은 중지된 것으로 하였다.

Table 3. Openings operation for case study

Door*	Case			
	1	2	3	4
D1	Closed	Closed	Closed	Open
D2	Open	Closed	Open	Closed
D3	Open	Open	Closed	Closed

* D1: door 1, D2: door 2, D3: door 3

III. 결과 및 고찰

1. 환경챔버 적용

Fig. 4는 환경챔버에서의 시간에 따른 Chung(1998)의 연구결과와 본 연구결과를 비교한 것이다. 이산화탄소의 농도 분포는 모든 구획에서 초기농도 1500ppm으로부터 시간에 따라 점차 감소되고 있음을 알 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 시뮬레이션 결과와 측정 결과 사이에는 약간의 차이가 있었는데, 이것을 측정값에 대한 평균편차(average deviation)로 나타내면 Table 4와 같다. 즉 Chung의 경우에는 구획 1, 구획 2, 구획 3에 대해 각각 6.1%, 7.7%, 4.1%였고, 본 연구의 경우에는 각각 2.66%, 3.35%, 3.15%로 나타났다. 두 경우 모두 실험치와 비교적 잘 일치함을 알 수 있지만 본 연구의 경우가 실험치와의 편차가 더 적음을 알 수 있다.

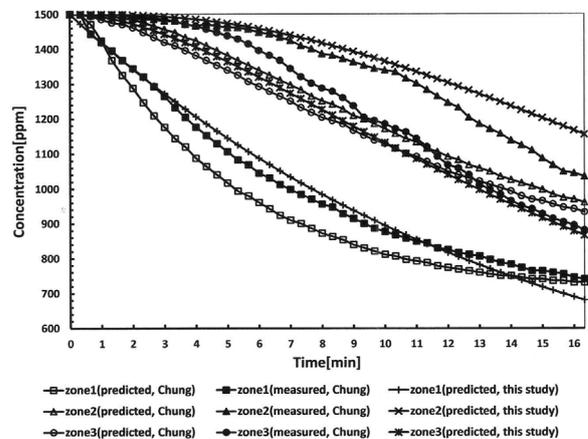


Fig. 4. Comparison of Chung(1998) and this study for CO₂ concentrations in environment chamber

Table 4. Average deviation of predicted values for measured values

Zone	Average deviation	
	Chung	This study
1	6.1%	2.66%
2	7.7%	3.35%
3	4.1%	3.15%

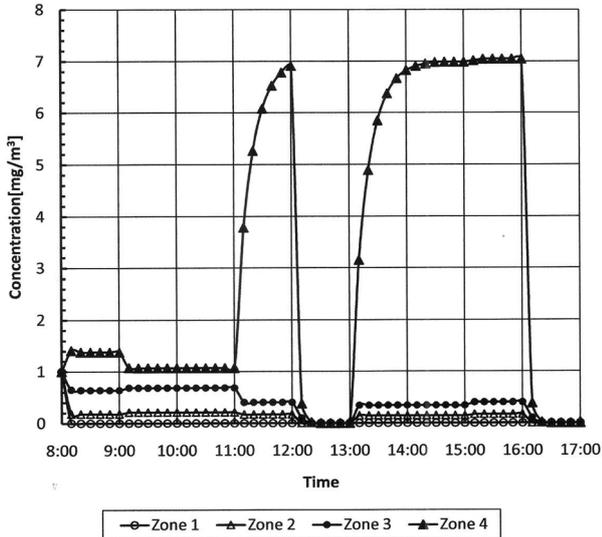


Fig. 5. Formaldehyde concentration profile for all interior zones

2. 산업현장 적용 예

연구방법에서 언급한 입력자료를 사용하여 4구획 공간을 가진 작업장에 본 모델을 적용한 결과, 시간에 따른 각 구획의 포름알데히드 농도는 Fig. 5와 같이 예측되었다. 구획 1에서의 오염농도는 작업이 시작된 후 10분 이내에 초기농도로부터 빠르게 감소한 후 30분 이후부터는 0의 값에 도달하였다. 이것은 이 구획에서는 전 예측시간 동안 오염물질이 발생하지 않는 데 기인한 것이며, 다른 구획에서도 오염물질의 발생이 중지되는 시간대(12~13시와 16~17시)에는 오염농도가 0의 값에 접근함을 알 수 있다.

약간의 오염물질이 발생하는 구획 2의 오염농도는 구획 1의 그것보다 조금 높았으며, 구획 3의 경우는 오염물질이 구획 2보다 2배로 발생하고 있으나 전 예측시간대의 평균농도는 구획 2의 그것보다 2.7배 정도 높게 나타나고 있다.

구획 4를 제외한 나머지 구획에서의 농도는 전체 시간 동안 우리나라 고용노동부에서 정한 노출기준(TWA)인 0.75 mg/m^3 보다 낮게 나타났지만, 구획 4의 경우에는 오염물질의 발생이 중지된 시간대를 제외한 나머지 시간대에서는 노출기준을 초과하고 있음을 알 수 있다. 또한 구획 4의 경우 오염물질이 구획 2보다 2배, 구획 1보다 4배로 발생하고 있으나, 전 예측시간대의 평균농도는 구획 2 및 구획 1의 그것에 비해 각각 7.9배 및 21배 정도로 높게

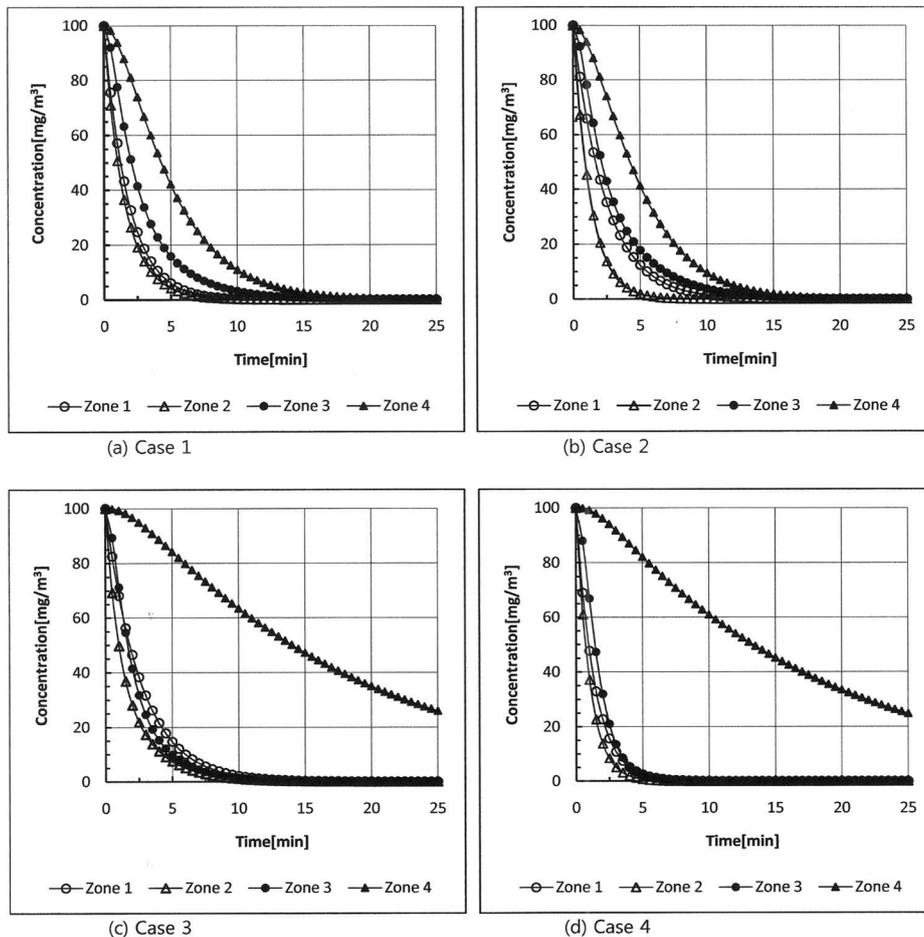


Fig. 6. Variations of formaldehyde concentrations with exposed time

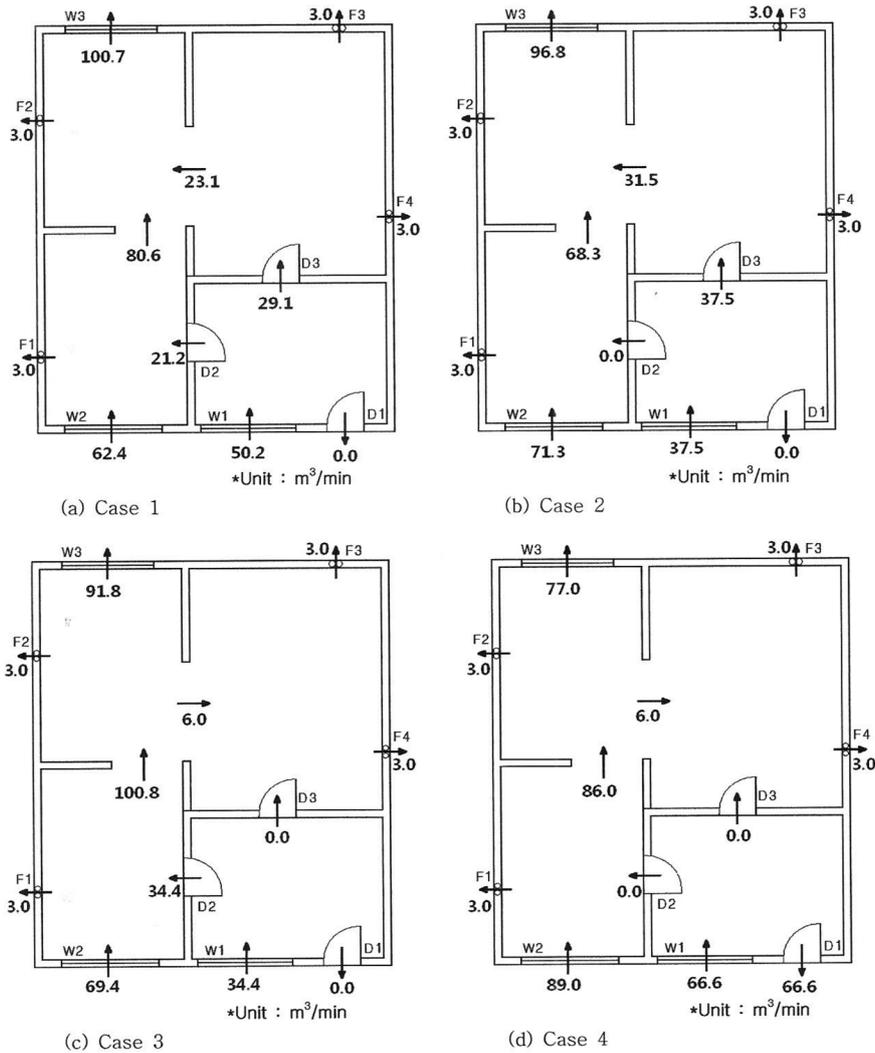


Fig. 7. Airflow rates for all openings

나타내고 있다. 특히 11~12시와 13~16시의 시간대에는 급격한 농도 상승을 나타내고 있다. 이것은 구획 1과 구획 4 사이의 문(D3)이 폐쇄된 상태에서는 구획 4에서의 환기가 충분하게 이루어지지 못함을 의미하는 것이다. 그리고 각 구획의 오염농도는 발생원의 영향보다도 환기 스케줄에 의한 공기유동의 변화에 더 밀접하게 관련이 있음을 알 수 있다.

Table 3에 나타난 케이스 연구를 통해, 각 경우에 따른 구획의 포름알데히드 농도 분포와 유동통로에서의 공기 유동량을 각각 Fig. 6 및 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이, 모든 경우에 대해 시간에 따른 포름알데히드 농도의 감쇄가 구획 2에서 가장 빠르고 구획 4에서 가장 늦으며, Case 3을 제외하고 구획 1에서의 감쇄가 구획 3에서보다 근소하게 빠름을 알 수 있다. 이러한 농도 감쇄는 Fig. 7에 나타난 바와 같이 각 유동통로의 공기 유동량과 밀접하게 관련이 있음을 알 수 있다.

구획 1에서의 감쇄는 Case 4, Case 1, Case 2, Case 3의 순으로 빨리 일어나고 있는데, 이것은 창문 W1을 통해 구획 1로 유입되는 외기의 양이 전적으로 영향을 미친

결과임을 알 수 있다. 구획 2에서의 감쇄는 각 경우에 대해 큰 차이는 없으나 Case 4, Case 2, Case 1, Case 3 순으로 빨리 일어나고 있다. 구획 1의 오염공기의 영향을 받지 않는 Case 4와 Case 2는 Case 1과 Case 3보다 감쇄가 빠르며, 창문 W2를 통해 구획 2로 유입되는 외기의 양이 전적으로 감쇄에 영향을 미치고 있다. 또한 Case 3이 Case 1보다 창문 W2를 통한 깨끗한 외기의 유입량이 근소하게 많은데도 불구하고 감쇄가 느린 것은 문 D2를 통한 유입량이 Case 1보다 많아서 구획 1의 오염공기의 영향을 더 많이 받은 결과에 기인한 것이다.

구획 3에서의 감쇄는 Case 4, Case 3, Case 1, Case 2의 순으로 빨리 일어남을 알 수 있다. 인접 구획간의 공기유동을 보면, Case 3과 Case 4는 오로지 구획 2의 영향을 받고 있는데 두 경우 중 Case 3이 구획 2의 영향을 더 많이 받고 있으며, Case 1과 Case 2는 구획 2와 구획 4의 영향을 받고 있는데, 이것은 두 경우 중 Case 2가 오염농도가 가장 높은 구획 4의 영향을 더 많이 받고 있음을 의미한다.

구획 4에서는 Case 1과 Case 2의 농도 감쇄가 유사하고, Case 3과 Case 4의 농도 감쇄 또한 유사한 값을 나타낸다.

이것은 문 D3의 개폐 여부가 농도 감쇄에 중대한 영향을 미치고 있음을 의미하며, 특히 문 D3가 폐쇄됨에 따라 구획 3과 구획 4사이의 공기유동 방향이 바뀌게 되고, 이로 인해 구획 4에서는 구획 3의 영향을 받을 뿐만 아니라 구획 내의 오염공기의 배출이 충분하지 못해 농도 감쇄가 매우 느리게 일어난 것임을 알 수 있다.

이처럼 각 구획에서의 시간에 따른 농도 감쇄는 외기의 유입량과 인접구획의 농도분포 및 인접구획으로부터의 공기유입량 등에 영향을 받고 있으며, 감쇄 정도는 그 구획의 오염물질 제거효과를 말해주는 것으로서 이것은 환기 효과와 밀접하게 관련된다. 따라서 문의 개폐 여부 등의 환기계획에 보다 신중한 접근이 필요할 것이다. 또한 Fig. 5 및 케이스 연구에서 살펴본 바와 같이, 구획 4에서의 환기 효과는 다른 구획에 비해 좋지 못하며, 특히 문 D3가 폐쇄되는 경우에는 환기가 매우 불충분한 것으로 나타나므로 궁극적으로는 구획 4에 설치되어 있는 송풍기 F3 및 F4의 배기용량을 높이는 것이 필요할 것이다.

작업장 및 각 구획의 물리적인 형상과 기상 상태 및 환기 계획은 일반적으로 오염물질 제거에 중대한 영향을 미칠 것이다. 하지만 본 연구에서는 특정 산업현장을 대상으로 그곳에서 실제적으로 발생하는 오염물질을 대상으로 농도를 예측한 것이 아니라, 임의로 가정한 작업장을 대상으로 본 연구에서 개발된 모델의 적용 예를 제시하는 데 주안점을 두었기 때문에, 변하지 않는 기상 상태에서 환기 계획에 따른 각 구획의 오염농도 분포만을 살펴본 것이다. 그러나 실제의 경우에 시간에 따른 기상 상태의 변화를 고려하기 위해서는 기상 상태의 입력변수를 고정하지 않고 시간에 따라 변화되는 값을 본 모델에 입력하면 될 것이다. 그리고 작업량/사용량/생산량/작업방법/환기성능 등이 시간에 따라 가변적일 때도 이에 따라 발생량 및 개구의 운전 데이터도 가변적일 것이다. 따라서 계측기기로 측정하는 것처럼 실시간으로 농도변화를 예측하는 것은 어렵겠지만, 시간을 작은 구간으로 나누어서 그 시간 간격동안의 평균값을 입력하는 방법을 사용하면 될 것이다.

또한 본 모델에서는 환경 챔버에 적용한 대상물질은 이산화탄소이고, 가상의 작업장에 적용한 물질은 폼알데히드이지만, 특정한 물질에만 적용 가능하도록 개발되지 않았다. 실제적인 작업공정에서 발생하는 오염물질이 정해지면 그 물질의 특성과 사용량 및 작업방법 등을 고려하여 산정된 발생량과 소실량을 입력하도록 함으로써 모든 물질에 대해 농도 예측이 가능하도록 하였다.

본 모델은 전체환기가 이루어지는 작업장에 적용되었으나, 실제 작업환경에서는 국소배기를 고려해야 한다. 국소배기는 전체환기와 달리 발생원에서 방출된 오염물질이 작업장 내로 확산되기 전에 포집 제거하는 환기방식이기 때문에, 국소배기를 본 모델에 적용하기 위해서는 국소배기장치에 의한 오염물질 제거량을 알아야 한다.

국소배기에 의한 제거량과 각 구획에서 자연스럽게 소실되는 양을 합하여 오염물질 질량평형 방정식[식 (3)]의 소실량 항에 입력함으로써 본 모델로도 국소배기장치가 있는 작업장의 농도를 예측하는 것이 가능하며, 향후 이에 대한 연구결과를 제시하는 것도 필요할 것이다.

서론에서 언급한 바와 같이, 국·내외적으로 작업환경 내의 오염농도를 예측하기 위한 이론적 연구가 매우 미흡한 실정이다. 그래서 타 문헌과의 비교가 어려웠으며, 향후에 실제적인 다양한 산업현장에서 직접 측정된 자료와 본 모델을 사용하여 이론적으로 예측한 결과를 비교 검토하는 연구가 필요할 것이다.

IV. 결 론

작업환경 내의 공기질에 대한 이론적인 모델링 연구는 그 중요성도 불구하고 국내에서는 아직 미미한 실정이다. 본 연구에서는 여러 구획으로 나누어진 작업장의 오염농도를 예측함으로써 작업환경 제어를 위한 환기 계획의 타당성을 분석하는 데 유용한 작업환경 공기질 예측모델을 개발하였다.

본 모델의 검증에 위해 Chung(1998)이 시뮬레이션 연구의 검증에 사용한 환경챔버의 자료 및 실험조건을 본 모델에 동일하게 적용하여 결과치를 서로 비교하였으며, 본 연구의 예측 결과를 Chung의 측정값에 대한 평균편차(average deviation)로 나타내면 구획 1, 구획 2, 구획 3에 대해 각각 2.66%, 3.35%, 3.15%로 나타났으며, 실험치와 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다.

또한 본 모델을 임의의 작업환경에 적용하여 그 다구획 작업장의 폼알데히드 농도를 예측한 연구를 통해 각 구획의 오염농도는 발생원에 의한 영향보다도 환기 스케줄에 의한 공기유동의 변화에 더 밀접하게 관련이 있음을 알 수 있었다. 또한 문의 개폐 여부 등의 환기 계획에 의한 케이스 연구를 통해 환기가 충분하지 않은 특정 구획과 좋지 못한 문의 개폐상태를 발견하는 것이 가능하였다. 즉, 구획 4에서의 환기 효과는 다른 구획에 비해 좋지 못하며, 특히 구획 1과 구획 4사이의 문(D3)이 폐쇄되는 경우에는 구획 4의 환기가 매우 불충분한 것으로 나타나므로 궁극적으로는 구획 4에 설치되어 있는 두 송풍기(F3 및 F4)의 배기용량을 높이는 것이 필요할 것이다.

이처럼 컴퓨터 시뮬레이션 기법을 사용함으로써 작업장의 배치도와 개구(창문, 문, 팬 등)에 대한 자료를 토대로 하여 환기에 의한 오염물질 제어 효과에 대해 예측하는 것이 신설공장의 경우에는 설계단계에서 가능할 것이며, 기존의 작업환경에 대해서도 직접 측정하지 않고도 작업장 내의 공기유동량과 오염농도를 예측하고 평가할 수 있을 것이다. 이를 통해 오염물질의 최적 제어를 위한 환기 계획의 수립이 가능할 것이다.

향후 실제 다양한 다구획 작업장을 대상으로 추적가스를 이용한 실험적 연구를 통해 검증 자료의 축적이 요

구되며, 본 연구 모델에 의한 예측 결과와의 비교를 통해 모델의 정확도를 더욱 향상시키는 노력이 필요할 것이다.

REFERENCES

- 조석호. 실내공기환경 예측을 위한 통합 다구획 모델의 개발. 한국환경과학회지 2006; 17 (9): 993- 1003
- 조석호. 외기상태의 변화에 따른 실내 환경인자의 민감도 분석. 한국환경과학회지 2010; 19 (2): 125-136
- Carnahan B, Luther HA, Wilkes JO. Applied numerical Methods. John Wiley & Sons, INC. 1969: 361-380
- Chung KC. Development and validation of a multizone model for overall indoor air environment prediction. HVAC & R Research 1996; 2 (4): 376- 385
- Chung KC. Airborne contaminant exposure control in a partitioned work environment by exhaust ventilation systems. AIHA Journal 1998; 59: 346-352
- Conte SD, De Boor C. Elementary numerical analysis, an algorithmic approach. McGraw-Hill 1972:88
- Mark N. Estimating exposure intensity in an imperfectly mixed room. AIHA Journal 1996; 57: 542-550
- Michael AJ, Deepak RD, Edwin HN, William DS. Development and evaluation of a source/sink model of indoor air concentrations from isothiazolone-treated wood used indoors. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 1995; 56: 546-557
- Ohira N, Yagawa N, Gotoh N. Development of a measurement system for multizone infiltration. ASHRAE Transactions 1993; 99: 692-698
- Shair FH, Heitner KL. Theoretical model for relating Indoor Pollutant concentrations to those outside. Environ. Sci. Tech. 1974; 8: 441-451
- Walton GN. Airflow and multiroom thermal analysis. ASHRAE Transactions 1982; 88 (2): 78-91
- Walton GN. A computer algorithm for prediction infiltration and interroom airflows. ASHRAE Transactions 1984; 90 (1B): 601-610
- Walton GN. Airflow network models for element- based building airflow modeling. ASHRAE Transactions 1989; 95 (2): 611-620
- Waters JR, Simons MW. The evaluation of contaminant concentrations and airflows in a multizone model of a building. Building and Environment 1987; 22 (4): 305-315
- Zhang JS. Combined heat, air, moisture, and pollutants transport in building environmental systems. JSME international Journal Series B 2005; 48 (2): 182-190