

환기량에 따른 실내공기오염농도의 감소효과에 관한 연구

A Study on the Reducing Effect of Indoor Air Pollutants Concentration according to the Ventilation

○ 김 완 기^{*}, 김 윤 일^{**}, 박 진 철^{**}, 이 언 구^{***}

Kim, Wan-Ki, Kim, Yoon-Il, Park, Jin-Chul, Rhee, Eon-Ku

Abstract

Toxic gases and noxious substances, which come from various architectural materials, are very harmful to human and the danger of those effect is a big problem around our environment. However, in reality, we seldom recognize this peril. Especially, formaldehyde, which comes from paint and various architectural finishing materials, exists in the air with gaseous phase. It can be easily absorbed into our skin and breathing this noxious gas may result in nervous and mental disease or cancer.

Various materials, which contaminate indoor air quality, can be eliminated or diminished effectively via proper ventilation among other methods

This paper tries to identify the relation between contaminants concentration and ventilation through experiment and computer simulation

키 워 드 : 실내공기오염물질(페인트, 포름알데히드), 실험실측정, 환기, 컴퓨터시뮬레이션,

keywords : Indoor Air Contaminant(Paint, Formaldehyde), Chamber Test, Ventilation, Computer Simulation

1. 서론

1.1 연구의 목적

각종 건축자재로부터 발생하는 가스 및 유해 물질의 발산은 인체에 대단히 해로우며 그로 인한 위험은 상상 이상으로 심각하지만, 그 심각성에 대해서는 크게 인식하지 못하고 있는 실정이다. 특히, 페인트 등의 건축 마감재료에서 발생하는 포름알데히드는 공기중에 가스 상태로 존재하여 피부에 흡수되기 쉽고, 특히 피부에

직접 닿지 않더라도 호흡기로 흡입시 신경 장애 현상 및 암을 유발하는등 인체에 치명적인 유해 물질로 널리 알려져 있다.

실내외에서 발생, 유입되는 각종 오염물질 및 분진 미생물등은 환기를 통해서 오염정도를 줄이거나 없앨 수 있기 때문에 환기가 실내 공기의 질을 제어하는데 가장 효과적인 방법이라고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 실내 마감용 페인트를 대상으로 환기량에 따른 실내공기오염농도 감소효과를 실험실측정과 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 확인함으로써 실내 공기 환경 개선을 위한 적정 환기량 산정의 기초자료를 제시하고자 하였다.

* 성회원, 중앙대학교 건축공학과 대학원

** 성회원, 경민대학 건축설비과 조교수, 공학박사

*** 성회원, 중앙대학교 건축학과 교수, 건축학박사

1.2 연구의 내용 및 방법

본 연구에서 실시된 연구의 내용 및 방법을 요약하면 다음과 같다.

(1) 실내공기환경 오염농도예측 및 수치해석 방법의 고찰

국내·외의 각종 문헌 및 연구자료를 통하여 실내공기환경 오염농도예측과 수치해석 방법을 특히, 환기효율과 관련하여 고찰하였다.

(2) 페인트에서 발생하는 포름알데히드 오염농도 변화량의 측정

환기량에 따른 실내공기오염농도 감소효과를 살펴보고자 실험용기를 제작하여 오염농도의 측정을 실시하였다. 측정은 밀폐된 실험용기 내에서 페인트로부터 발생하는 포름알데히드의 오염농도를 환기량 및 시간의 변화량에 따라 실시하였다.

(3) 실내공기오염농도 예측 시뮬레이션 실시

실내공기오염농도가 환기량과 밀접한 관계가 있음을 고려하여, 환기량에 따른 실내오염농도분포산정을 위해 범용 유체 해석 프로그램 (PHOENICS V.3.2)을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하였다.

2. 실내공기환경 오염농도예측 및 수치해석 방법의 고찰

2.1 오염농도 예측

실내공기오염물질 중 특히, 각종 건축재료 등에서 방출되는 오염원은 오염농도를 좌우하는 변수가 너무 많아 예측하기가 무척 어렵다. 즉, 오염물질의 함유량과, 방출정도, 시간 및 운습도 뿐만 아니라 환기량에 의해서도 큰 영향을 받고 있다.

따라서, 본 연구에서는 실내에서 발생하는 오염물질에 대해, 주로 환기효율에 따른 오염농도

를 예측하였다.

한편, 각국에서 적용하고 있는 포름알데히드의 실내기준 농도도 작업환경 및 지역에 따라 여러 가지 기준치를 적용하고 있지만 ASHRAE와 WHO등에서 권장치로 적용하고 있는 100ppb정도를 주택의 기준치로 보는 것이 타당할 것으로 판단된다.

2.2 오염농도의 이론적 해석

실내에서 발생하는 오염물질은 공기의 유동에 따라 농도분포가 좌우되며, 따라서 오염물질의 농도분포 해석을 위해서는 실내 공기의 유동을 해석해야 한다.

유체의 유동해석 및 농도분포해석을 위한 지배방정식에는 질량보존법칙(Navier-Stokes 운동방정식), 운동량 보존 방정식(연속 방정식), 에너지 보존법칙, 이류확산방정식(농도 방정식)이 사용된다.

다음은 본 연구에서 적용된 수식을 정리한 것이다.

■ 연속 방정식;

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (\text{수식 1})$$

■ 운동량 방정식;

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (\text{수식 2})$$

■ 난류 운동에너지 방정식;

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j} + G - \rho \epsilon \quad (\text{수식 3})$$

■ 난류 운동에너지 소산율 방정식;

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} + \frac{\epsilon}{k}(C_1 G - C_2 \rho \epsilon)$$

$$\frac{C_{\mu} \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \rho \epsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{\rho \epsilon^2}{k} \quad (\text{수식 4})$$

■ 농도 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j C) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial C}{\partial x_j} + S_j \quad (\text{수식 } 5)$$

3. 페인트에서 발생하는 포름알데히드 오염농도 변화량의 실험실 측정

3.1 개요

미국 NIOSH(National Institute for Occupational Safety and Health)에 의하면 실내공기환경을 개선시키기 위한 여러 가지 요인들 중에서 환기가 실내공기질에 가장 큰 영향을 미치고 있으며 또한, 실내 공기질을 제어하는데 가장 효과적인 방법이라고 할 수 있다.

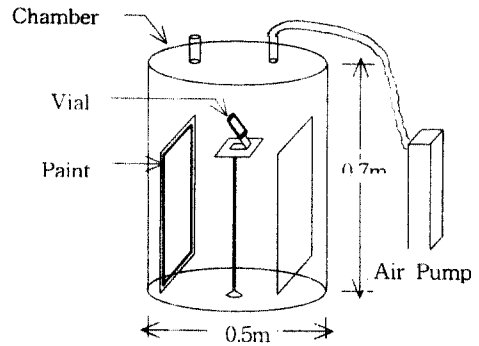
따라서, 본 장에서는 환기량에 따른 실내공기오염농도 감소효과를 살펴보기 위해 실험용기를 제작하여 오염농도 측정을 다음과 같이 실시하였다.

즉, 실험은 오염물질 발생 가능성을 배제한 채실(스테인레스)로 축조된 밀폐된 실험용기에서<표 1참조> 건축 마감재료 중 포름알데히드 오염물질의 발생이 많은 페인트재료를 대상으로, 발산되는 포름알데히드의 농도분포를 환기량과 시간의 변화에 따라 측정하였다(그림 1, 2 참조).

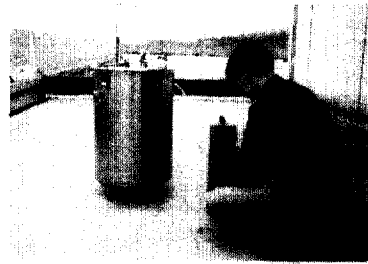
오염물질의 농도측정은 시간가중평균치로 측정이 가능한 Formaldehyde Monitoring Kit(SKC 社)를 사용하였고 Digital Colorimeter를 이용하여 오염농도를 산정하였다.

<표 1> 실험용기 재원 및 측정개요

실험용기 크기 및 구성요소	실험 건축재료	측정방법
크기 0.14m ³ 인 원통형 (직경0.5m, 높이0.7m)	국내 석유화학 제품 페인트	단위표면적당 발생하는 포름알데히드 발생량을 환기량 및 시간의 변화량에 따라 측정 *환기방법: 정확한 유량을 산정 할 수 있는 air sampler 사용



(그림 1) 실험용기 투시도



(그림 2) 실험 장면

3.2 환기량 변화에 따른 오염농도 변화 측정

대부분의 나라에서는 일률적으로 재실자에 의한 최소환기량만을 적용하고 있는데, 최근 유럽 국가들에서는 재실자를 기준으로 하는 최소환기량 외에 건물재료 등에서 발생하는 오염원을 기준으로 환기량 산정에 적용시키고 있다. 즉, 건물로부터 발생하는 오염의 정도를 세분하여 최소 0.7 liter/sec.m²(ACH=1.2회)부터, 신축 후 1년간은 1.7 liter/sec.m²(ACH=2.9회), 오염물질의 방출이 심한 경우에는 2.8 liter/sec.m²(ACH=4.8회)까지 환기량을 증가시키도록 하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 이와같은 자료를 근거로 단위시간내에 오염원으로부터 발생하는 포름알데히드의 환기량에 따른 농도값의 변화를 확인하기 위해 10 liter/min, 30 liter/min, 60 liter/min의 환기량을 실험용기에 적용시켰으며 이때 적용된 환기량을 실험용기 공간의 환기횟수로 환산하면, 시간당 4.3회, 13회, 25.7회 등이 된다. 한편, 환기량

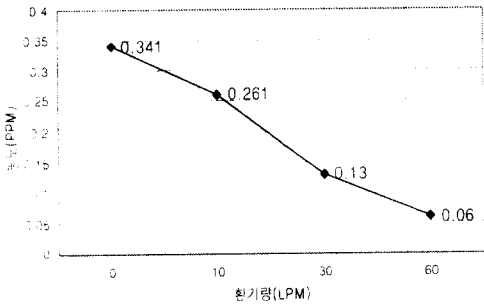
의 조절은 유량을 정확히 산정 할 수 있는 Air Sampler를 사용하였다(그림 2 참조).

측정결과는 <표 2>와 같다.

<표 2> 환기량에 따른 농도변화

	환기 0 (밀폐)	환기 10 LPM	환기 30 LPM	환기 60 LPM
	포집 시간 (분)	95	95	95
농도 (ppm/m ³)	0.341	0.261	0.130	0.060
감소비율 (배)	0	-0.77 (1.3배)	-0.38 (2.6배)	-17.6 (5.7배)

<표 2>에서 나타난 바와 같이 밀폐된 실험체 내의 페인트에서 발생하는 포름알데히드 오염물질의 초기방사량은 0.341 ppm/m³ 이었다. 이 때, 환기량을 10 liter/min, 30 liter/min, 60 liter/min으로 증가시켜감에 따라, 오염농도의 감소비율은 1.3배, 2.6배, 5.7배의 큰 폭으로 감소하고 있었다. 실험 결과와 같이 실내공기오염농도는 환기량 증가에 따라 감소하고 있음을 확인할 수 있었다(그림 3참조).



(그림 3) 환기량에 따른 오염물질의 농도감소

3.3 시간의 경과에 따른 오염농도 변화 측정

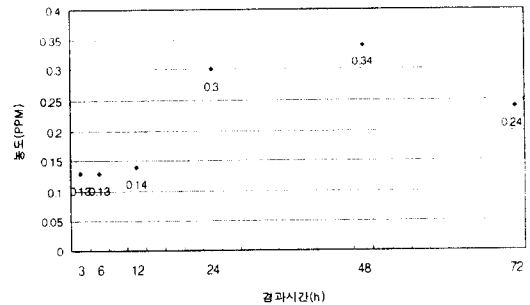
또한, 시간의 경과에 따른 포름알데히드의 농도 변화를 살펴보기 위하여 다음과 같은 실험을 실시하였다. 즉, 앞에서 실험에 적용하였던 실내오염원에 따른 환기량 값 중 10LPM(4.3회/h)의 환기량을 적용시켜, 오염물질 설치 후, 시간

변화에 따른 농도분포를 측정하였다<표 3>.

<표 3> 시간경과에 따른 농도변화

환기량		시간	3	6	12	24	48	72
		hour	hour	hour	hour	hour	hour	
10 LPM	농도 (PPM)		0.13	0.13	0.14	0.3	0.34	0.24
	변화량 (PPM)	기준	0	+0.01	+0.16	+0.04	-0.1	

<표 3>의 결과를 살펴볼 때, 시간의 경과에 따라 오염물질의 농도는 환기가동이 시작되었을 지라도, 초기에는 점차 증가하다가 일정시간 이후부터는 감소하는 것으로 나타났다.



(그림 4) 시간의 변화에 따른 오염농도 변화

따라서, 이와같은 결과로 미루어 볼 때, 실내공간에서 오염물질을 발생시키는 오염원이 설치된 직후, 초기에는 환기를 실시하여도 일정시간까지는 오염물질의 방사량 세기와 실내공간에 누적된 오염물질로 인하여 오히려 그 값이 시간이 지남에 따라서 증가할 수 있음을 알 수 있었다. 또한, 실내공간에서 오염원이 설치될 경우 초기에는 실내 오염물질의 농도 값을 낮추기 위해서 더 많은 환기량이 요구될 것으로 판단된다.

4. 실내공기오염농도 예측 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션 개요

환기량에 따른 포름알데히드의 농도변화 및 농도분포를 정량적으로 분석하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션(PHOENICS V.3.2)을 실시하였다.

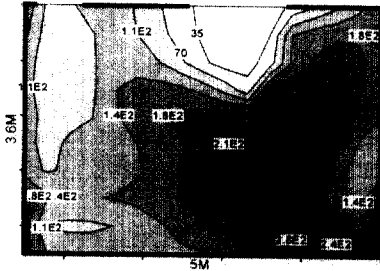
시뮬레이션 대상 모델은 장방형의 단일실 구조로서 환기창과 개구부가 각각 1개씩 설치된 약 5.5평 규모의 일반거실을 대상으로 하였다. 이 때, 오염물질인 포름알데히드는 실을 구성하고 있는 4면의 벽면으로부터 동일량이 연속적으로 발산되는 것으로 가정하였으며, 방사량은 실 측값을 환산하여 적용하였다.

한편, 시뮬레이션에 적용된 환기회수는 0.5회/h, 1.0회/h, 3.0회/h, 5.0회/h 등이다.

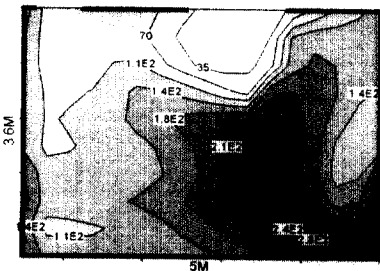
<표 4> 시뮬레이션 공간의 개요

실의 규모	5m×3.6m×2.1m
개구부	창: 1.2m×0.6m 문: 0.9m×1.8m
오염물질	종류:포름알데히드 방사율:0.698ppb/s/m' 방사면적: 15.72m'
환기횟수	0.5회, 1.0회, 3.0회, 5.0회,

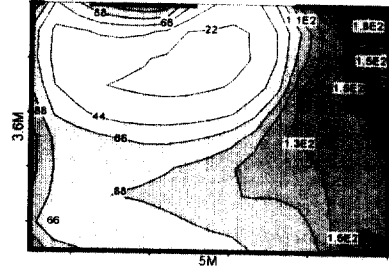
4.2 시뮬레이션 결과



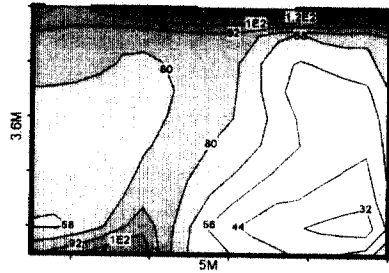
(그림 5) ACH=0.5회, 평균농도:145ppb
(최대값:308ppb, 최소값:12ppb)



(그림 6) ACH=1회, 평균농도:140ppb
(최대값:301ppb, 최소값:8ppb)



(그림 7) ACH=3회, 평균농도:91ppb
(최대값: 205ppb, 최소값:14ppb)



(그림 8) ACH=5회, 평균농도:74ppb
(최대값:137ppb, 최소값:24ppb)

실의 환기횟수를 0.5회에서 5회까지 변화시키면서 시뮬레이션 한 결과 실의 평균 오염물질 농도는 145ppb에서 74ppb까지 50%정도 감소하는 것으로 나타났다. 실의 오염물질 농도 분포를 살펴보면 환기횟수가 커질수록 전반적으로 낮은 농도의 오염물질 분포가 실 전체에 고르게 분포되는 것으로 나타나 실의 공기환경이 크게 개선되는 것으로 나타났다.

또한 실내 오염물질의 농도 및 분포는 환기로 인한 실내 기류의 특성에 크게 좌우되기 때문에 개구부의 위치 및 환기성능이 실내 공기의 오염도를 결정하는 중요한 요소임을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구는 환기가 실내 오염물질의 농도분포에 미치는 영향을 확인하고 환기변수에 따른 실내 공기환경의 개선을 위한 기초자료를 도출하는 것을 목적 하였다.

연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 환기량의 변화에 따른 오염물질의 농도 변화 측정 결과 밀폐한 상태에서 60LPM으로 환기량이 늘어남에 따라 실험체 내의 포름알데히드 농도는 0.341ppm에서 0.060ppm까지 최대 5.7배 감소하는 것으로 나타나 가능한 한 환기량을 크게 하는 것이 실내 오염물질의 농도를 낮추는 데는 유리한 것으로 나타났다.

2) 시간의 경과에 따른 실내 오염물질의 농도 변화를 최소 3시간에서 최대 72시간까지 변화시키면서 측정된 결과 본 연구에서 오염원으로 사용한 페인트의 경우 오염원의 설치로부터 일정 시간까지는 실험체내의 오염농도가 증가하다가 다시 감소하는 것으로 나타났다.

결과적으로 오염원의 특성에 따른 오염물질의 초기 발산량 및 시간의 경과에 따른 발산강도의 변화가 실내 오염물질의 농도분포에 다양한 영향을 미치는 것으로 판단된다. 본연구에서 사용한 실내 마감용 페인트의 경우 실내 오염물질의 농도값을 낮추기 위해서는 초기에 더 많은 환기량이 요구될 것으로 판단된다.

3) 범용 유체해석 프로그램인 PHOENICS를 이용하여 단위공간을 대상으로 컴퓨터 시뮬레이션한 결과 환기량을 0.5회에서 5회까지 늘릴 경우 오염물질인 포름알데히드의 실내농도값이 평균 50%정도 감소하는 것으로 나타났으며 환기량이 클수록 오염물질이 실내에 저농도로 고르게 분포되는 것으로 나타났다.

따라서 실내 마감재료로부터 발생하는 오염물질을 제거하여 건강한 실내공기환경의 질을 확보하기 위해서는 공간의 환기성능을 향상시킬 수 있도록 적절한 개구부의 위치와 크기를 계획하여야 할 것이다.

6. 참고문헌

- 1) 이언구, 박진철, 건축재료에서의 실내공기오염물질 발생농도 측정 연구, 1998. 6, 한국건축설비학회, 창간호, Vol.1 No.1, pp.125-137.
- 2) 이언구, 박진철, 이상형, 『공동주택의 실내 공기환경 개선에 관한 연구』, 공기조화 냉동공학회 논문집, 8권 3호, pp.397-412. 1996.
- 3) 이언구, 박진철, 방정현, 『다세대주택 반지하세대의 실내공기환경 측정에 관한 연구』, 대한건축학회 추계학술발표 논문집, 1998. 10.
- 4) 김신도, 21세기 실내공기환경의 질 세미나 발표집. 대한건축학회, 1998. 9. pp.3-8.
- 5) 한국과학재단(김윤신 외). 실내의 공기질의 유해평가 관리 및 기준치 개발에 관한 연구. 1991. 9.
- 6) Anthony L.Hines, Indoor AIR Quality and Control. New Jersey: PTR Prentice Hall, 1993. pp.166-167
- 7) Indoor Air '93. Proceedings of the 6th International Conference on Indoor Air Quality and Climate. Helsinki, Finland: 1993, Vol.4.
- 8) Samet, J.M. and Spengler, J.D. Indoor air pollution: a health perspective. London: The Jones Hopkins Press, 1991.
- 9) Hays, S.M., Gobbell R.V., Ganick N.R., Indoor Air Quality: solutions and strategies. New York: McGraw-Hill, Inc., 1995.
- 10) Operators Manual Radon WL Meter, Thomson & Nielsen Electronics, 1990.
- 11) U.S. EPA, Interim Indoor Radon & Radon Decay Product Measurement Protocols. 520/1-86-04,1986
- 12) CHAMS. PHOENICS User's Manual. 1997