

시뮬레이션을 통한 실내 오염물질 확산의 예측 방법

강기남*, 송두삼**†

성균관대학교 대학원*, 성균관대학교 건축공학과**

A Prediction of the Indoor Contaminant diffusion using Network Simulation

Kang, Ki-nam*, Song, Doo-sam**†

*Graduate School, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

**Department of Architectural Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

ABSTRACT: CFD simulation is a tool very useful to predict the generation and absorption of the contaminant from the construction materials for the single room condition. However, there is a limit in multi-room simulation for analyzing air movement and contaminant concentration at the condition that the door of each room was closed.

A lot of network simulation tool were developed which can used to analyze the mass transfer and contaminant concentration as results in the multi-room condition. However, existing network simulation method was not able to analyze the change of the heating and cooling load with the ventilation as though the change of the indoor air-pollution density was predictable.

In this study, new approach to predict heating/cooling load and indoor contaminant concentration will be reviewed. New indoor contaminant concentration module reviewed in this study was coupled with existing ESP-r network simulation method. The validity of new approach will be analysed for comparison the results of simulation and field measurement results.

Key words: ESP-r(Environmental Systems Performance-research), Air Flow(기류 이동), Network Simulation(네트워크 시뮬레이션), Contaminant Transport(오염물질 전달), HCHO(포름알데히드)

1. 서론

환기시스템의 성능을 종합적으로 평가하기 위해서는 정량적인 실험 및 실측 방법이 있으나 이는 시간상 제약 및 경제적인 부담으로 인해 일반적으로 시뮬레이션 방법을 이용하는 경우가 많다. 컴퓨터 시뮬레이션은 공동주택의 설계 및 시공단계에서 사전평가가 가능하고 다양한 설정조건에서 분석이 가능하기 때문에 널리 이용되고 있다. 특히 실내 오염물질 농도 시뮬레이션은 네트워크 시뮬레이션(network simulation)과 CFD 시뮬레이션

선이 사용된다.

CFD 시뮬레이션은 건자재로부터의 오염물질의 방출, 흡착특성의 묘사 및 실내 오염농도 분포 등을 상세하게 검토하는 것이 가능하다. 하지만 공동주택의 다실(多室)공간에서 각 실의 개구부를 밀폐하여 침기에 의해서만 실 간 공기이동이 이루어지는 상황을 묘사하는 데는 한계점이 있다.⁽¹⁾

네트워크 시뮬레이션은 각 실간 이동, 각 node 간의 물질이동, 열 이동을 묘사할 수 있고 CFD 시뮬레이션이 갖고 있는 한계점을 극복하고 각 실간의 기류이동에 따른 오염물질 이동을 실제 상황과 아주 근접하게 표현할 수 있는 장점이 있다. 그러나 기존의 네트워크 시뮬레이션 방법은 주로 물질이동의 예측에 주안을 두고 있어, 실제 공동주택의 환기시스템 가동에 따른 건물 냉/난방부하

†Corresponding author

Tel.: +82-31-290-7551; fax :+82-31-290-7550

E-mail address: dssong@skku.edu

나 열 쾌적성의 변화 등에 따른 여러 가지 요소를 복합적으로 검토할 수 없다는 한계점을 가진다⁽²⁾.

본 논문에서는 최근에 제안된 통합 네트워크 시뮬레이션 기법인 ESP-r을 기반으로 하는 실내 공기질 예측 시뮬레이션 방법의 유효성을 실제 실측 데이터와 비교/검토하고, 실내외의 압력 차이 및 각 실 개구부의 개폐여부에 따른 기류의 흐름과 오염물질의 확산, 시간에 따른 농도의 감쇠현상 등을 시뮬레이션 기법을 통해 검토하고자 한다.

2. 네트워크 시뮬레이션

2.1 통합시뮬레이션(integrated simulation) 기법

ESP-r(Environmental Systems Performance for research)⁽³⁾은 UK Science와 Engineering Research Council(현재 EPSRC) 그리고 European Commission's DGXII의 기금으로 수년간에 걸쳐 개발되어 여러 연구결과를 통해 그 정확성이 입증된 프로그램이다. ESP-r은 건물과 플랜트에 대한 에너지 및 환경을 모델링, 평가할 수 있고 실제 건물의 상황을 정밀하게 묘사하여 수치해석의 정밀도를 높일 수 있다는 장점이 있다. 대상건물 내에서 발생하는 다양한 요소(건물 열흐름, 자연 조도의 분포, 분포된 유동의 흐름, 실 간 기류 흐름)를 동시에 고려할 수 있다.

최근 실내 공기질 예측모델의 개발로 냉난방과 공기질 시뮬레이션의 통합시뮬레이션이 가능하다.

2.2 기류시뮬레이션 모델링

시뮬레이션 상에서 각 실간 공기이동은 틈새(Cracks)와 다양한 개구부(Opening), 급/배기팬을 통해 침기와 환기의 형태로 흐른다.

기류 네트워크는 물질평형(Mass Balance)의 원칙 하에서 존(Zone)과 노드(Node)의 연결(Opening, Cracks, Ducts, Pipes)에 의한 결합으로 구성되며 이 연결은 기류의 흐름과 기압차 사이에 단순한 비선형 관계를 이룬다. 기류 모델링 네트워크 접근은 먼저 경계조건(Boundary condition)을 결정해야 하며, 다양한 유체의 흐름과 압력차이의 관계에 대한 수학적 표현이 명확해야 한다.

Fig. 1은 기류 네트워크 모델링의 한 예이다. 각 실은 좌표축(X, Y)을 이용한 존(Zone)으로 구

성된다. 외기는 크랙(Type 120)을 통하여 유입되어 각 실 사이의 개구부(Type 130) 또는 크랙(Type 120)을 통해 이동, 유출된다. 환기시스템을 통한 공기의 유출입은 Type 30에 의해 정의된다. Fig. 1의 모델링은 기본적으로 기류네트워크 알고리즘⁽⁴⁾을 기본으로 하기 때문에 다음과 같은 가정이 전제된다.

- ① 오염 물질의 흐름은 압력차이의 함수
- ② 1개 존 내의 공기의 압력과 밀도는 일정
- ③ 존 내의 오염물질은 완전확산을 가정
- ④ 존 내의 오염물질의 분포는 무시
- ⑤ 오염물질의 이동시 정체현상은 없음.
- ⑥ 침전, 응고의 메커니즘은 없음.
- ⑦ 미세한 오염물질은 공기의 밀도나 부분적인 압력은 영향을 받지 않음.

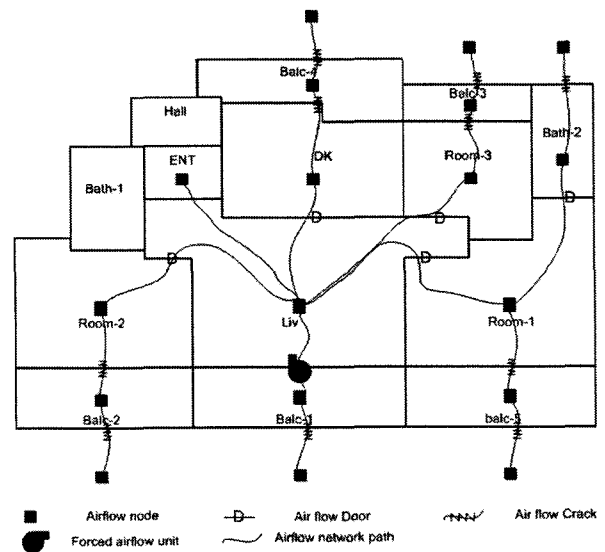


Fig. 1 Building modeling for network simulation.

2.3 공기이동 및 농도변화 시뮬레이션 모듈⁽⁴⁾

침기 및 환기시스템의 적용여부, 실의 방문 개폐 여부 등에 따른 실 간의 기류이동 및 오염물질의 이동, 농도변화 특성은 다음과 같이 정의된다.

2.3.1 기류 시뮬레이션 컴포넌트

침기와 같은 창문 및 출입문 등의 미세한 틈새를 통한 공기이동은 'Specific Air Flow Crack Component(Type 120)' 모듈을 적용하였

다. 모듈내 관계식은 식 (1-1), (1-2), (1-3)으로 정의된다.

$$m = \rho \times k \times \Delta P^x \quad (1-1)$$

$$x = 0.5 + 0.5 \times e^{(-500 \times W)} \quad (1-2)$$

$$k = L \times 9.7 \times \frac{(0.0092)^x}{1000} \quad (1-3)$$

여기서, m : 풍량[kg/s]
 W : 크랙 너비[m]
 L : 크랙 길이[m]
 ρ : 밀도[kg/m³]
 k : 차출계수[m³/s/Pa^x]
 x : 유체 누설지수

상대적으로 큰 개구부의 경우 오리피스(Orifice)의 흐름 방정식에 따른다. 모듈은 'Specific Air Flow Opening Component(Type 110)'을 적용하였으며, 그 관계식은 식 (2)로 정의된다.

$$\dot{m} = C_d \times A \times \sqrt{2 \times \rho \times \Delta P} \quad (2)$$

여기서, m : 풍량[kg/s]
 C_d : 유량계수[0.65]
 A : 개구부 면적[m²]
 ρ : 밀도[kg/m³]

Fig. 2와 같이 출입문과 같은 수직의 넓은 개구부의 공기이동은 'Specific Air Flow Door Component(Type 130)'를 적용하였다. 공기의 흐름을 양방향성으로 가정하며, 온도 차이에 의한 공기의 밀도변화로 나타난다. 그 관계식은 식 (3)으로 정의된다.

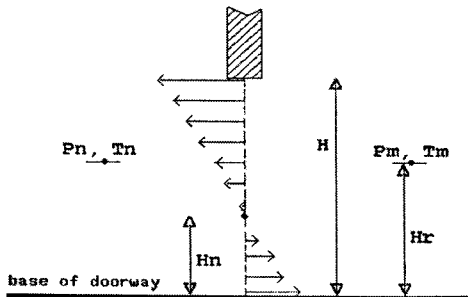


Fig. 2 Bi-directional air flow across a doorway(type 130).

$$m^* \approx \rho(2/3)[C_d WH(2/\rho)^{1/2}(C_a^{3/2} - C_b^{3/2})/C_t] \quad (3)$$

여기서, W : 개구부의 너비[m], H : 개구부의 높이[m], $r_p = H_r/H(-)$, g : 중력가속도[9.81 m/s²], p_o : 대기압[101325 p_a], R : 건조공기의 밀도[=287.1 J/kgK], Θ : 노드(node)의 온도[K], H_r : 개구부의 기초 저면에서의 참조높이[m]

만약 개구부의 높이가 매우 작거나(< 0.01m) 미세한 온도(< 0.01 K)나 온도 차이가 없다면 'Door Component'인 'Air Flow Opening(type 110)'을 적용한다.

Type 30은 "constant flow rate component"로서 팬(fan)을 말하며, 관계식은 식 (4)로 환기시스템의 급/배기팬 및 주방 후드 배기팬의 작동시에 적용된다.

$$m = \rho \times a \quad (4)$$

여기서, m : 풍량[kg/s]
 ρ : 밀도[kg/m³]
 a : 풍량[m³/s]

2.3.2 실내 오염농도 예측 컴포넌트

오염물질 예측 컴포넌트는 식 (5)로 정의된다.

$$m_{ai}^* \approx m_{ai} + \Delta t \left[\sum_j F_{ji}^* (1 - \eta_{\alpha ji}) C_{\alpha j} + m_i^* \sum_{\beta} K_{\alpha\beta} C_{\beta i} + G_{ai} - (R_{ai} + \sum_j F_{ij}^*) C_{ai} \right]$$

(5)

여기서, m : 질량, Δt : 타임스텝, F : 풍량, η : 필터 효율, C : 오염물질의 질량비, K : 1차 화학 반응 비 상수, G : 발생율, R : 제거계수, i : 대상 존, j : 그 외 존, α : 대상 오염물질, β : 그 외 오염물질, * : 다음 타임스텝 값

3. 네트워크 시뮬레이션을 통한 실내 오염물질의 이동 및 농도변화 특성의 검토

3.1 분석 대상의 개요

분석대상 공동주택 단위세대는 경기도 화성시 대안읍 병점 소재 S사 아파트로, 신축, 미 입주 상태

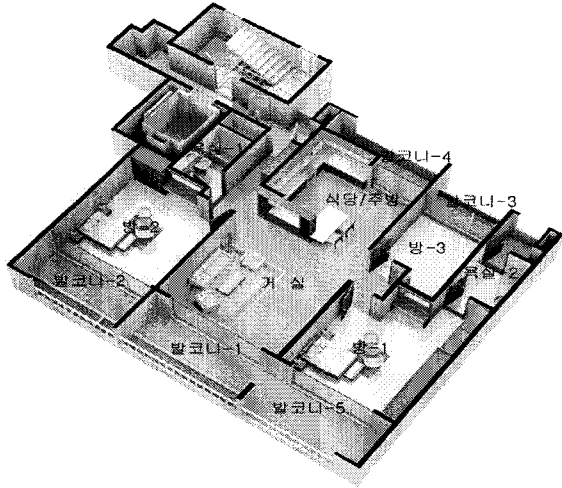


Fig. 3 Analysed model

의 준공 후 약 3개월이 경과된 38평형 중간층 세대이다. 분석대상 세대는 기본적인 마감재만이 시공된 상태로 가구나 기타 생활용품은 없는 상태이다.

3.2 시뮬레이션 조건 및 케이스

시뮬레이션은 대한설비공학회에서 작성한 서울지역의 기후데이터를 기본으로 하여, 풍향과 풍속을 실측조건⁽⁵⁾과 동일하게 각각 남풍, 2 m/s로 수정하였다. 침기회수는 실측결과⁽⁵⁾를 바탕으로 0.29 회/h로 설정하였다. 여기서 침기의 흐름은 주풍향에 면한 전면부 발코니를 통해 각 실을 거쳐 후면발코니로 빠져 나가는 것으로 가정하였다. 외부 HCHO농도 및 내부 HCHO발생량은 측정결과를 바탕으로 하였다. 이와 같은 내용은 Table 1과 같다.

본 논문에서 검토한 시뮬레이션 케이스는 Table 2와 같다. 여기서, 침기에 의해서만 실간 기류이동이 발생하는 경우를 Case 1로 하고 거실에 환기시스템을 설치한 경우를 Case 2, 전실에 환기시스템을 설치한 경우를 Case 3으로 하였다. 각 케이스에 대해 각 실간 개구부를 open한 상태를 -1, close한 상태를 -2로 하여, 개구부 개폐유무에 따른 실간 공기이동 특성의 변화를 검토하고자 하였다.

Table 3은 각 실에 설치된 환기시스템의 풍량을 보이고 있다.

Table 1 simulation conditions

기상데이터	설비공학회 30년 데이터
시뮬레이션 기간	1월 1일(24시간)
외부 풍향	남풍(기상데이터 수정)
외부 풍속	2 m/s(기상데이터 수정)
침기회수	0.29 회/h (실측 데이터 기준)
외부 HCHO 농도	0.004 mg/m ³ (실측 데이터 기준)
실내 HCHO 발생량	0.00001737 mg/m ³ ·s

Table 2 simulation cases

케이스	환기시스템적용 여부	설치위치	방문 개/폐
Case 1-1	미적용	-	Open
Case 1-2	미적용	-	Close
Case 2-1	적용	거실	Open
Case 2-2	적용	거실	Close
Case 3-1	적용	전실	Open
Case 3-2	적용	전실	Close

Table 3 Air change rate of ventilation system

존(Zone)	체적 [m ³]	풍량 [m ³ /h]	환기회수 [회/h]
침실 I (안방)	47.98	43.2	0.9
침실 II	39.96	36.0	
침실 III	26.28	23.7	
거실, 식당/주방	108.25	97.4	

3.3 시뮬레이션 모델링의 타당성 검증

본 시뮬레이션을 수행하기에 앞서 선행 시뮬레이션의 결과와 본 논문에서 검토하고 있는 공동주택 대상세대에 대한 현장 실측치⁽⁵⁾를 비교 검토하였다. 실측치 결과는 '실내공기질 공정시험법'에 의거하여 각 실의 문을 전부 개방하고, 거실 중앙에서 측정된 결과이다.

Fig. 4는 침기(0.29 회/h)만 존재하는 경우, 거실 중앙에서 실내 오염물질 농도를 측정된 결과이다.

Fig. 5는 거실 및 침실1, 침실3에 환기시스템 설치(0.9 회/h)하고 환기시스템 가동후의 농도변화를 측정된 결과이다.

시뮬레이션의 경우 조건은 현장 실측조건과 동일하며, 초기 입력치는 모두 실측치를 적용하였다.

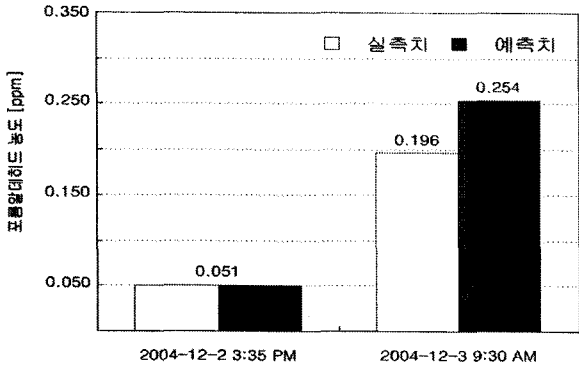


Fig. 4 HCHO concentration variation(infiltration condition)

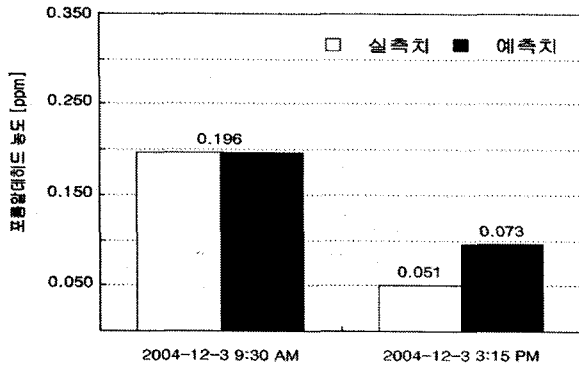


Fig. 5 HCHO concentration variation(ventilation condition)

Fig. 4에서 침기시 시뮬레이션 예측치가 실측치에 비해 약 30% 정도 높은 값을 나타내고 있다. 본 시뮬레이션의 경우 각 실의 측정 점에서의 농도가 완전 확산되었다고 가정하고 있으나, 실제 측정치의 경우, 실의 농도분포가 발생하여 측정점에 따라 다소 상이한 결과를 보이고 있다. 이러한 현상은 환기를 하지 않는 침기만 존재하는 경우에 두드러지게 나타나고 있다.

Fig. 5에서 환기시스템 작동 시, 예측치가 실측치에 비해 약 43% 정도 증가 하였으나 환기시스템 작동 시 실측치와 예측치 간의 작은 오차를 보였고, 전체적으로 유사한 패턴을 유지하였다.

3.4 시뮬레이션 결과

실내에서 체적 당 일정하게 발생하는 포름알데히드(HCHO)에 따른 환기시스템의 설치 여부 및 설치 장소 그리고 실내 개구부의 개폐여부에 따른 24시간 동안 실내에서의 기류의 흐름에 대한

오염물질의 농도를 분석하였다.

3.4.1 침기 (0.29 회/h)시 각 실의 개구부 개폐유무가. Case 1-1 : 침기만 고려(방문 Open)

실의 체적 당 발생하는 오염물질의 양을 동일하다고 가정, 침기 시 각 실 사이의 개구부를 개방한 결과, 모든 실에서의 오염물질의 농도가 거의 유사하게 나타났다.

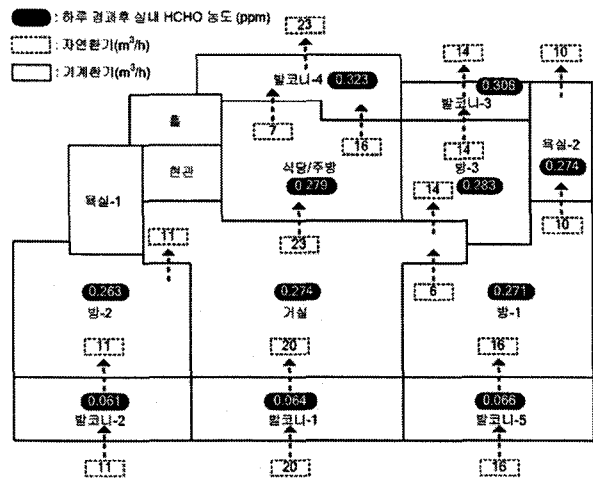


Fig. 6 An air movement HCHO concentration distribution (CASE 1-1, Door Open)

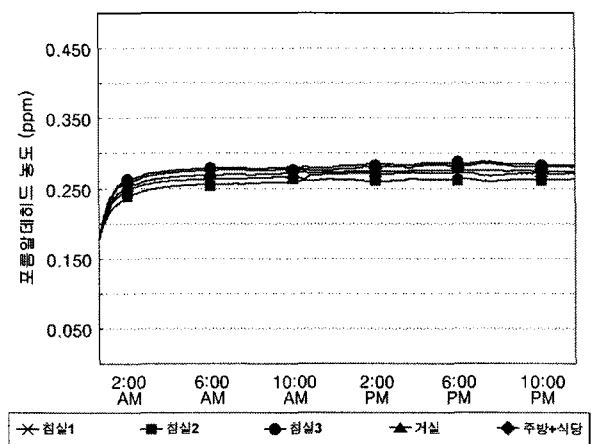


Fig. 7 HCHO concentration variation (CASE 1-1, infiltration condition)

Case 1-2 : 침기만 고려(방문 Close)

실내에서 발생하는 오염물질의 양, 각 개구부(방문)를 제외한 침기 조건은 Case 1-1과 동일하다. Case 1-2에서는 각 실의 개구부를 닫은 경우 실간 공

기이동, 오염물질 농도의 변화를 검토하고자 하였다.

각 실사의 개구부를 닫음으로 인해 각 실에 유입되는 침기량이 Case 1-1에 비해 감소하여 각 실의 오염물질 농도가 상승하는 경향을 보이고 있다. 특히 침실 2의 경우 방문을 닫음으로써 침기량이 현격히 감소하여 체적 당 발생하는 오염물질이 타실과 동일함에도 불구하고 오염물질의 농도가 높게(침실 1에 비해 약 0.10 ppm 높은 결과) 나타났다. 침실3의 경우는 침실1, 2, 거실에서 높은 농도의 공기가 유입됨으로써 결과적으로 가장 높은 실내 농도분포를 보이고 있다.

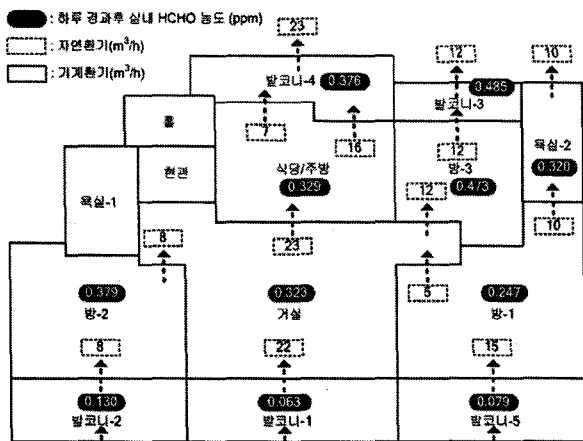


Fig. 8 An air movement of the space and HCHO concentration. (CASE 1-2, Door Close)

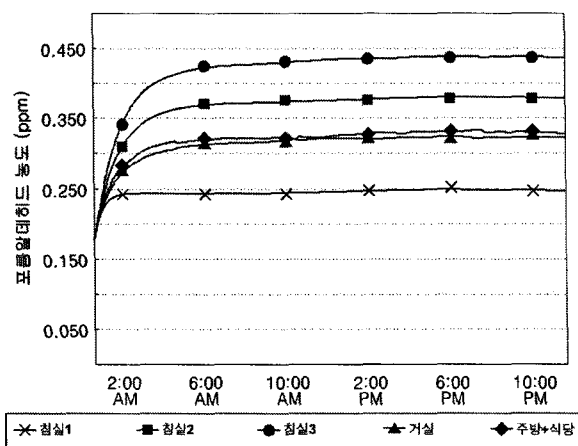


Fig. 9 HCHO concentration variation (CASE 1-2, infiltration condition)

3.4.2 거실환기시스템 설치 시 개구부(방문)의 개폐 유무

가. Case 2-1 :환기시스템 적용(거실 설치, 방문 Open)
거실에 환기시스템(0.9회/h)을 설치, 강제 환기를 통해 외기량 유입이 증가하였다. 또한 실의 개구부를 전부 개방함에 따라 실 전체의 기류의 흐름이 원활하여 오염농도가 약 0.10 ppm으로 낮은 결과를 나타냈다. 동일한 조건하에 환기시스템을 미설치한 Case 1-1과 비교하면 실의 포름알데히드(HCHO) 농도는 약 절반 이하로 감소하였다.

한편 환기시스템에서 유입과 유출의 풍량 차이가 발생하는 것은 공기의 밀도와 압력 차이에 의한 것으로 판단된다.

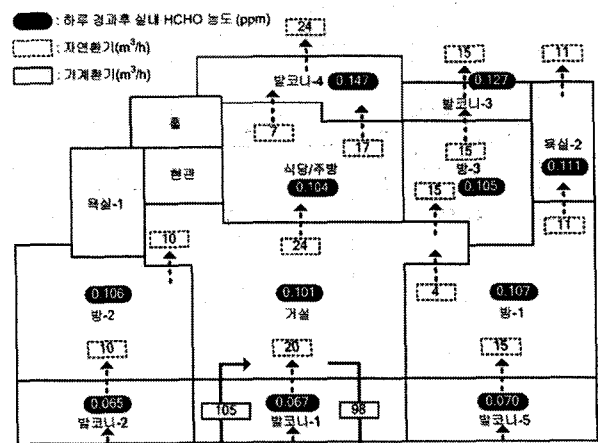


Fig. 10 An air movement of the space and HCHO concentration. (CASE 2-1, Door Open)

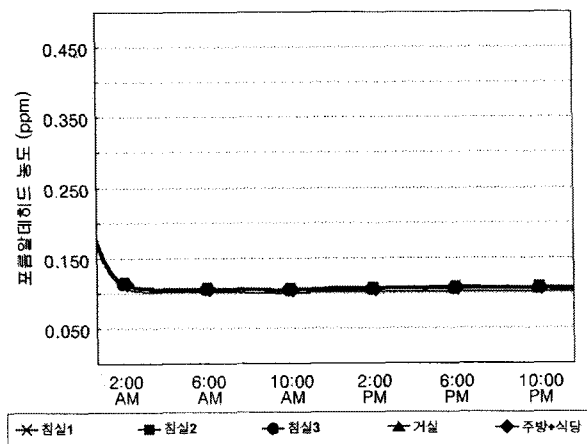


Fig. 11 HCHO concentration variation (CASE 2-1, ventilation at living room)

나. Case 2-2 :환기시스템 적용(거실 설치, 방문 Close)

환기시스템을 거실에 설치 가동하였을 경우, 거실의 포름알데히드 농도는 Case 1-2에 비해 약 1/4 정도 감소하였다. 그러나 침실 1, 침실 2의 농도는 환기시스템을 가동하지 않은 Case 1-2에 비해 약간 증가하는 경향을 보이고 있다. 이것은 거실에서 환기시스템을 가동함에 따라 거실부분의 압력이 상승, 침실 1, 2의 침기량이 감소한 것에 의한 것으로 판단된다.

거실부분에서 공기이동이 상대적으로 많은 침실 3의 경우 거실부분의 오염농도가 낮아짐에 따라 더불어 실의 오염농도가 낮아지는 경향을 보였다.

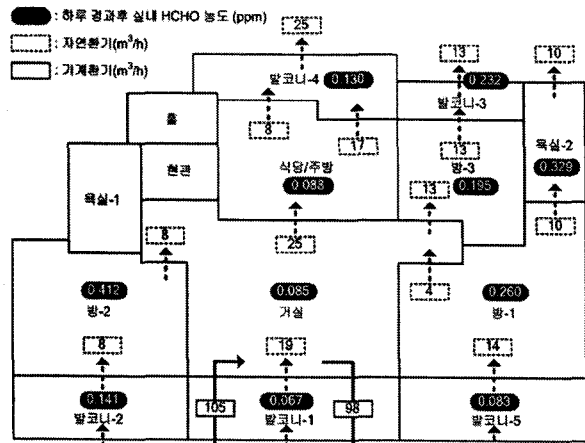


Fig. 12 An air movement of the space and HCHO concentration (CASE 2-2, Door Close)

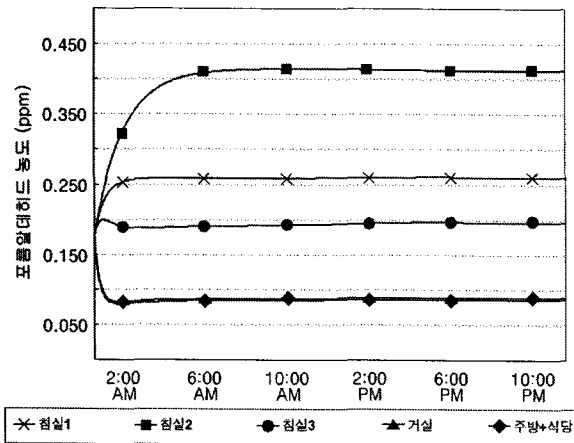


Fig. 13 HCHO concentration variation (CASE 2-2, ventilation at living room)

3.4.3 전 실 환기시스템 설치 시 개구부(방문)의 개폐 유무

가. Case 3-1 :환기시스템 적용(전실 설치, 방문 Open)

실내에서 발생하는 오염물질의 양은 일정하다는 가정 하에 전실의 방문을 모두 개방한 상태이다.

전실에 환기시스템을 설치할 경우 외부로부터 공기의 유입량이 많아짐에 따라 실내는 정압의 상태를 유지하게 됨으로 실내에서의 기류의 흐름은 보다 원만하게 된다. 또한 실내 벽체의 배치 특성상 각 실의 개구부가 서로 면하고 있는 상태에서 개방된 상태이므로 오염물질의 이동이 원활하여 전체적으로 낮은 농도를 보였다.

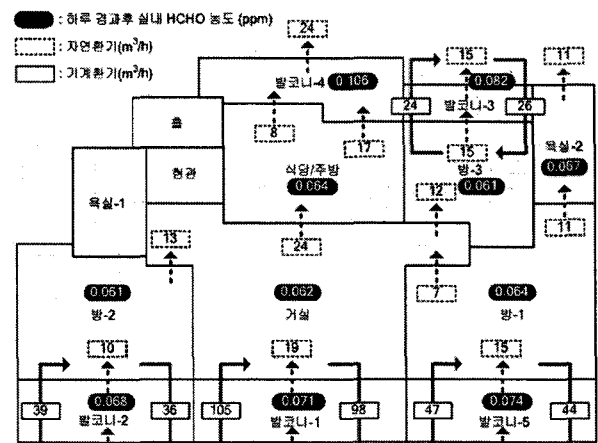


Fig. 14 An air movement of the space and HCHO concentration. (CASE 3-1, Door Open)

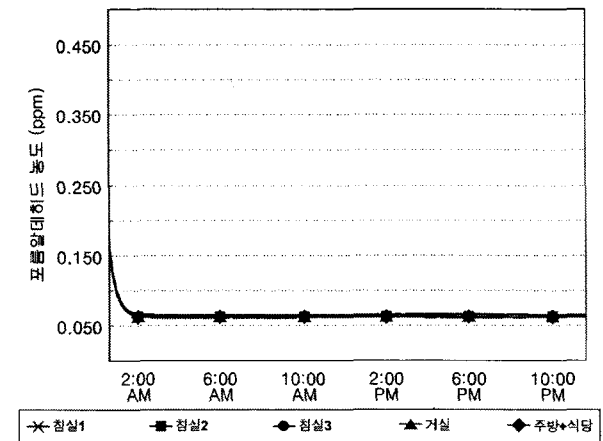


Fig. 15 HCHO concentration variation (CASE 3-1, ventilation at all room)

나. Case 3-2 : 환기시스템 적용(전실 설치, 방문 Close)

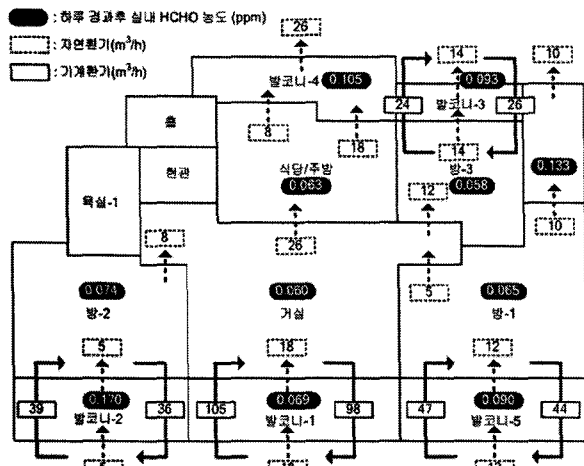


Fig. 16 An air movement of the space and HCHO concentration (CASE 3-2, Door Close)

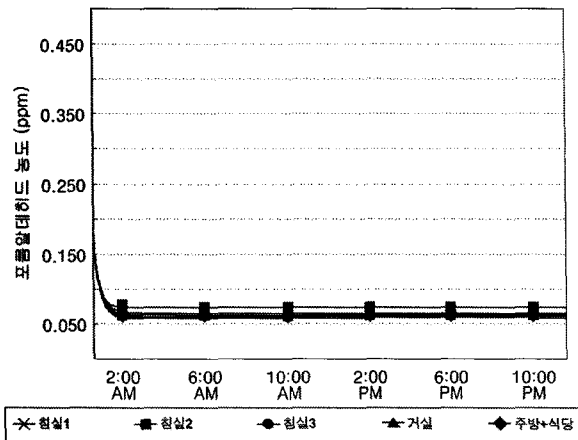


Fig. 17 HCHO concentration variation (CASE 3-2, ventilation at all room)

각 실에서 환기시스템의 가동하고, 개구부(방문)를 닫음으로서 각 실의 침기량은 감소하나 기계 환기에 의해 각 실의 오염물질의 농도는 개구부의 개폐에 별로 영향을 받지 않고 전체적인 오염물질의 농도감소가 이루어졌다. 즉 각 실에 환기시스템을 설치할 경우, 각 실의 오염농도는 각 실의 개구부 개폐의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 논문에서는 통합 네트워크 시뮬레이션을 ESP-r을 이용하여 실내 공기질 예측 시뮬레이션 방법의 유효성을 실제 실측 데이터와 비교/검토하였다. 각 실 개구부의 개폐여부에 따른 기류의 흐름과 오염물질의 확산, 시간에 따른 농도의 감소현상 등을 실제 공동주택의 특성을 반영한 시뮬레이션 기법에 대해 검토하였다. 향후 환기에 따른 냉난방부하 특성의 변화, 에너지비용의 증감 특성 등 실내 공기질 예측과 통합된 시뮬레이션 결과를 제시할 예정이다.

후 기

본 연구의 일부는 과학기술부(한국과학재단) 특정기초연구지원으로 수행되었음. (과제번호 : R01-2005-000-11063-0)

참고문헌

1. Cho, W. H., A, Development of Simulation Tool to Evaluate Performance of Ventilation System, Proceeding of the SAREK 2005 Summer Annual Conference, pp. 76-82
2. Song, D. S. A Prediction Method for a Contaminant Transport with the Air Flow in Multi-zone, Proceeding of the AIK 2005, pp. 59-62
3. ESRU, The ESP-r System for Building Energy Simulation User Guide(Ver.9 Series. University of Strathclyde.
4. Intergration Of Contaminant Behaviour Prediction Within Whole Building Simulation, Montreal, Canada, Building Simulation 2005, Glasgow, UK, G1 1XJ
5. Ko, H. J., et al, The Effects of Ventilation System on IAQ in an Apartment House, Proceedings of the SAREK 2005 Summer Annual Conference, pp. 848-854