

고층형 주거건물의 연돌효과에 의한 공기 및 오염물질 이동에 관한 연구

A study on the contaminant dispersion by stack effect in high-rise residential building

이 준 호* 이 중 훈** 송 두 삼***
Lee, June-Ho Lee, Joong-hoon Song, Doosam

Abstract

With the building is higher and higher, the stack effect is more and more remarkable. The stack effect accompanies many problems in high-rise building such as draft, troublesome in door opening, uncomfortable noise, contaminants dispersion, etc.

In this study, the air movement and accompanied contaminants dispersion by stack effect in high-rise building, and diluting the contaminants concentration were analyzed.

The analysis was performed for high-rise residential building in Seoul, Korea and the network simulation method was used.

The results show that the indoor contaminants concentration and air movement caused by stack effect have interdependent relationship.

키워드 : 연돌효과, 오염물질농도, 건물 내 공기유동

Keywords : Stack effect, Contaminants concentration, Building air movement

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

실내 공기환경(Indoor Air Quality)에 대한 문제는 실내 거주자의 건강문제와 직접적으로 결부되어 있으며 하루 중 실내에서 90%이상 생활하는 현대인의 생활패턴을 고려하면 매우 신중하게 다루어져야 한다.

실내 거주자는 포름알데히드, 휘발성유기화합물(VOCs) 등 실내 구조체 및 마감재료에서 발생하는 오염물질과 인간의 거주행위 및 난방과 취사를 위한 연료의 연소, 보균자에 의한 바이러스 등 실내 활동에 의해 발생하는 오염물질에 의한 실내오염원, 외부에서부터 유입되는 오염물질 등 다양한 오염원에 노출되어 있다.

또한, 최근 건설기술의 발달과 인구의 증가로 인하여 건물은 점차 고층화되고 있으며, 건물에너지 절감의 측면에서 건물들이 기밀하게 시공되고 있어, 결과적으로 건물의 환기성능은 저하되고 있다고 할 수 있다. 이러한 건물의 고층화 및 고기밀화는 주거건물 또한 예외가 아니어서 국내에서도 40층을 초과하는 초고층의 주거건물들이

많이 건설되고 있다.

한편 계획적인 공조에 의해 실내 냉난방, 환기가 이루어지는 사무소 건물과 달리 대부분의 주거건물에서는 입주자에 의해 선택적으로 실내 냉난방이 이루어지고 있으며, 환기시스템의 경우 주로 기계환기시스템이 설치되어 있지만 실제 많은 세대에서 가동이 되지 않고 있는 것이 현실이다. 이러한 측면을 고려할 때, 고층 주거건물은 층간, 단위세대간 공기유동에 의한 오염물질 확산이 오피스 건물에 비해 현저할 것으로 판단된다. 이러한 실내 공기유동은 외기 온도나 풍환경의 변화에 의해서도 그 특성이 수시로 변할 수 있는데, 특히 겨울철의 경우, 실내외 온도차의 증가로 인해서 연돌효과에 의한 공기유동이 두드러지게 나타나고 있다.

고층 주거건물의 연돌효과에 관한 국내 논문으로 조재훈 등¹⁾은 주상복합건물에 대한 실측을 통해 연돌효과로 인한 문제점을 규명하고 이에 대한 저감방안을 작성하여 시뮬레이션을 통해 저감방안의 연돌효과 저감 특성에 대해 검토한 바 있다. 또한 이광호 등²⁾은 실측을 통해 국

1) 조재훈 외, 사례연구를 통한 고층건물에서의 연돌효과 실측 및 저감방안, 대한건축학회논문집 계획계 18권 7호(통권 165호), 2002, pp. 169-176.

2) 이광호 외, 초고층 주상복합아파트의 기밀 성능 및 연돌효과 특성에 관한 연구, 대한건축학회논문집 계획계 21권 12호(통권206호), 2005, pp. 279-286.

* 성균관대학교 건설환경시스템공학과 석사과정 (ifeelings@skku.edu)
** 삼성물산 기술연구소 선임연구원 (jh6925.lee@samsung.com)
*** 교신저자, 성균관대학교 건축공학과 교수 (dssong@skku.edu)

내 초고층 주상복합 건물의 기밀성과 연돌효과의 관계를 규명하여 보고하고 있다.

한편 건물 내 공기유동에 의한 오염물질 확산에 관한 연구로 송두삼 등³⁾은 공동주택 내 실간 공기유동에 의한 오염물질 확산에 대해 네트워크 시뮬레이션을 통해 검토하였다. 김광호 등⁴⁾은 겨울철 초고층 아파트에서 연돌효과에 의해 음식냄새가 확산되는 양상에 대해 분석하고 이를 해결하기 위한 환기시스템의 급/배기구 위치 선정에 관해 검토, 보고하고 있다.

고층 주거건물에서 연돌효과에 따른 오염물질 확산으로 문제가 되었던 대표적인 해외사례로 2003년 홍콩의 아모이 가든의 SARS(Sever Acute Respiratory Syndrome, 중증 급성 호흡기증후군) 확산⁵⁾을 들 수 있다. 아모이 가든은 33층으로 이루어진 고층형 주거 건물로 저층부인 4층에서 처음 SARS 감염자가 발생하였으나 이 SARS균이 연돌효과에 의한 건물 내 공기유동을 통해 상층부 세대로 이동하여 상층부 세대 거주자가 대거 감염되는 결과를 초래, 총 321명이 집단 감염되는 결과를 초래하였다.

이처럼 고층 건물에서 발생하는 연돌효과 문제는 단순히 재실자의 거주성 저하뿐만 아니라 거주자의 건강, 위생(衛生)의 측면에서 반드시 고려되어야 한다는 것을 보여주고 있으며, 특히 바이러스 확산에 의한 집단감염의 위험성을 내포 있다는 점에서 매우 신중히 대처해야 할 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 네트워크 시뮬레이션 기법(CONTAMW)을 사용하여, 고층 주거건물에서 겨울철 연돌효과에 의한 건물 내 공기유동 특성을 규명하고, 이 결과를 바탕으로 고층 주거건물의 각 세대에서 일정량의 오염물질이 발생할 경우, 연돌효과에 의한 건물 내 공기유동이 각 세대의 오염물질 농도 형성에 어떠한 영향을 미치는지 검토하고자 한다.

2. 연돌효과에 따른 실내 오염물질 확산

2.1 연돌효과의 개요

고층건물의 경우, 높이가 높아짐에 따라 거대한 수직 샤프트공간이 불가피해지며, 이를 통한 건물 내 지배적인 공기유동이 발생하게 된다. 즉, 소위 연돌효과라고 하는 엘리베이터 샤프트나 계단실과 같은 수직샤프트 공간을 통한 공기유동이 발생하게 되는 것이다.

Spread of virus from Block E to other blocks in Amoy Gardens

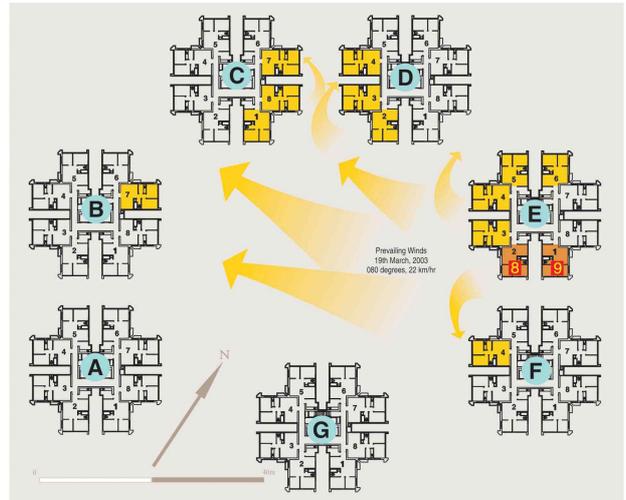


그림 1. 아모이 가든 SARS 확산

연돌효과는 건물 내외부의 압력차에 의해 결정되는데 건물의 실내외 압력차는 다음 식(1)과 같이 건물의 높이가 높을수록, 건물 내외부의 온도차가 클수록 크게 나타난다.

$$\Delta P = g(h - h_{npl})\rho_o(T_i - T_o) / T_o \quad (1)$$

- ΔP : 압력차(Pa)
- h : 대상 건물의 높이(m)
- h_{npl} : 기준 대기압 높이(m)
- T : 절대온도, [K]
- g : 중력가속도($\approx 9.8m/s^2$)
- ρ : 공기밀도 (kg/m^3)

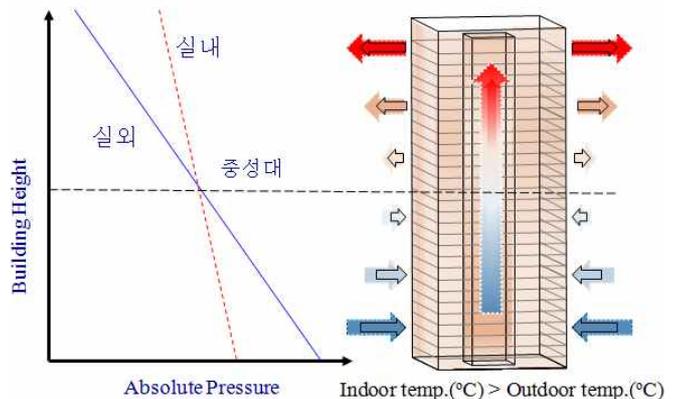


그림 2. 고층건물에서 연돌효과에 의한 공기유동 양상

또한 그림2와 같이 연돌효과에 의해 지배되는 고층건물 내 공기유동은 수직샤프트와 외기 간의 압력차가 제로가 되는 중성대를 기점으로 중성대 상부에서는 수직샤프트에서 외기로 공기가 유출되며, 중성대 하부에서는 외기에서 수직샤프트로 공기가 유입되는 현상을 보인다. 이때, 연돌효과로 발생하는 공기유동량 Q는 다음 식으로 나타난다.

3) Doosam Song et.al.(2007), A Prediction of the Indoor Air Movement and Contaminant Concentration in a Multi-Room Condition, International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, Vol. 15-3, pp. 137-146.
 4) 김광호 외, 초고층 공동주택의 스택효과가 단위주거에서 코어로의 냄새확산에 미치는 영향 분석, 대한건축학회논문집 계획계 제23권 제9호(통권227호), 2007, pp.129-138.
 5) Sing Lee, et. al. (2005), The experience of SARS-related stigma at Amoy Gardens, Social Science & Medicine, Vol. 61, pp. 2038-2046.

$$Q = \alpha A \sqrt{\frac{2g}{\gamma} \Delta P} \quad (2)$$

- Q : 공기유동량(m^3/s)
- αA : 상당누기면적(m^2)
- γ : 공기밀도(kg/m^3)
- ΔP : 압력차(Pa)
- g : 중력가속도($\approx 9.8m/s^2$)

2.2 고층건물에서 오염물질의 확산

실내에서 발생하는 오염물질 농도는 다음 식으로 나타난다.⁶⁾

$$m_{\alpha,i}^* = m_{\alpha,i} + \Delta t \left[\sum_j F_{j,i} (1 - \eta_{\alpha,j,i}) C_{\alpha,j} + G_{\alpha,i} + m_i \sum_{\beta} \kappa_{\alpha,\beta} C_{\beta,i} - (R_{\alpha,i} + \sum_j F_{i,j}) C_{\alpha,i} \right] \quad (3)$$

- $m_{\alpha,i}^*$: Δt 후의 i 에서 α 의 물질량 [kg/s]
- $m_{\alpha,i}$: i 에서 α 의 물질량 [kg/s]
- $F_{j,i}$: j 에서 i 로의 공기유동량 [kg/s]
- $F_{i,j}$: i 에서 j 로의 공기유동량 [kg/s]
- $\kappa_{\alpha,\beta}$: α 와 β 의 반응계수
- $\eta_{\alpha,j,i}$: j 에서 i 로 흐를 때 α 에 대한 필터 효율
- $R_{\alpha,i}$: i 에서 α 의 저장량 [kg_{air}/s]
- $G_{\alpha,i}$: i 에서 α 의 발생비율 [mg/s]
- $C_{\alpha,j}$: j 에서 α 의 농도 [ppm]
- $C_{\alpha,i}$: i 에서 α 의 농도 [ppm]
- $C_{\beta,i}$: i 에서 β 의 농도 [ppm]

이와 같이, 실내오염물질의 농도는 실내에서 발생하는 오염물질의 양(또는 발생속도), 실내로 유입되는 공기 중 오염물질 농도, 실내에서 유출되는 공기량 등에 의해 결정된다.

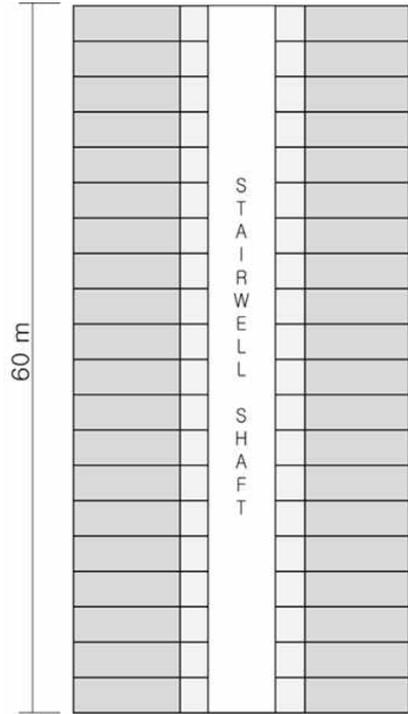
한편 초고층건물의 경우에는 연돌효과가 건물 내 공기 유동에 지배적인 영향을 미쳐, 이것에 의해 건물 내 오염물질의 확산이나 건물 내 오염물질의 농도가 형성되게 된다. 따라서 특히 겨울철과 같이 연돌효과가 현저하게 나타나는 계절에는 연돌효과에 의한 건물 내 공기유동 특성을 이해하는 것이 건물 내 오염물질 확산을 이해, 방지하는데 매우 중요하다.

3. 시뮬레이션 검토

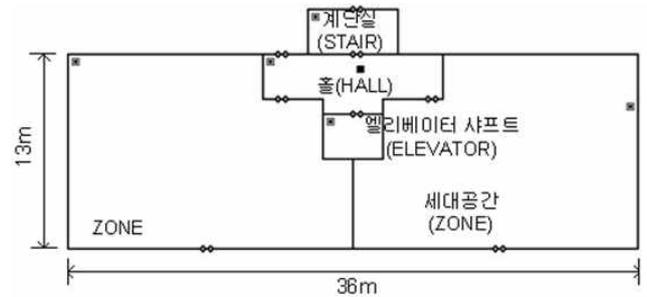
3.1 대상건물 개요

본 장에서는 20층 규모의 공동주택을 대상으로 겨울철 연돌효과에 의한 대상 건물 내 공기유동, 그에 따른 각 세대별, 층별 오염농도의 변화 특성을 검토 하고자 한다. 그림3-a 에서 대상건물의 입면도를, 그림3-b 에서 기준층 평면에 대한 모델링 개요를 나타낸다. 대상건물은 50평형 규

모의 판상형 아파트로 전체 20층이며 층고는 3m이다. 엘리베이터 샤프트는 양측의 세대 사이에 위치하며, 계단실은 공용부 홀 외벽 면에 접하는 구조로 되어 있다. 각 세대 내부의 절대 압력은 동일한 것으로 가정하여 세대 내 내부구획은 설정하지 않았다.



a) 입면도



b) 평면도

그림 3. 대상건물

3.2 시뮬레이션 개요

대상건물의 연돌효과에 의한 공기유동, 오염물질 확산을 규명하기 위한 방법으로는 본 연구에서는 네트워크 시뮬레이션 툴인 CONTAMW가 이용되었다. 대상공간과 같이 검토지점이 많은 경우 네트워크 시뮬레이션 기법을 이용하여 많은 지점에 대해 동시에 각 지점의 공기특성(압력분포, 온도)이나 오염물질 농도에 대해서 용의하게 예측할 수 있다. 네트워크 모델의 공기유동 해석은 다음의 알고리즘⁷⁾을 따른다.

6) Dols, W. S, Walton, G. N, Denton, K. R. (2000). CONTAMW 1.0 User Manual, National Institute of Standards and Technology, pp.111-112

7) Dols, W. S, Walton, G. N, Denton, K. R. (2000). CONTAMW 1.0 User Manual, National Institute of Standards and Technology, p.115

$$F_{j,i} = f(P_j - P_i) \quad (4)$$

$F_{j,i}$: j 에서 i 로의 공기유동량 [kg/s]

P_j : j 에서의 압력 [Pa]

P_i : i 에서의 압력 [Pa]

여기서, 공기질량이 이상기체법칙을 따른다고 가정하면 다음과 같은 식을 도출할 수 있다.

$$m_i = \rho_i V_i = \frac{P_i V_i}{RT_i} \quad (5)$$

T_i : 존 i 에서의 절대온도, [K]

R : 기체상수 287.055 [J/KgK]

P_i : i 에서의 압력 [Pa]

m_i : i 에서의 공기질량, [Kg]

시간(t)에 따른 비정상상태의 유동은 질량보존의 법칙에 의하여 다음과 같다.

$$\frac{dm_i}{dt} = \sum_j F_{j,i} + F_i \quad (6)$$

m_i : i 에서의 공기질량, [Kg]

$F_{j,i}$: j 에서 i 로의 공기유동량 [kg/s]

네트워크 모델에서 발생하는 오염물질량은 다음의 알고리즘을 따른다.

$$S = G - D \cdot C \quad (7)$$

S_α : α 의 발생량 [kg_α/s]

G_α : α 의 발생비율 [kg_α/s]

D_α : α 의 저감비율 [kg_{air}/s]

C_α : α 의 현재 농도 [kg_α/kg_{air}]

시뮬레이션을 위한 기본적인 건물 내 외부 조건은 표1, 표2와 같다. 외기온도는 서울지방의 최저 평균온도인 $-11.3^\circ C$ 로, 실내온도는 $22^\circ C$ 로 설정하였다. 건물외피의 기밀성능은 $2.1 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ 로 설정했으며, 현관 및 내부 구획 도어의 기밀성능은 CONTAMW library, 실측데이터⁸⁾, ASHRAE데이터⁹⁾ 등을 참조하였다. 그 외에 오염물질로는 CONTAM library의 CO를 설정하였으며, CO는 실내공간과 외부에서만 발생하며 계단실, 홀, 엘리베이터샤프트에서는 발생하지 않는 것으로 가정하였다. 실내 CO 발생량은 300 mg/h , 외기의 CO는 $1.47[\text{ppm}]$ 으로 설정하였다.

표 1. 대상건물의 개요

구분	내용
용도	주거건물
평면	판상형
규모/층수	50 평 / 지상 20층
엘리베이터(E/L)	1층 ~ 20층

8) 조재훈, 고층 주거건물에서 연돌효과로 인한 압력분포 예측 및 평가, 박사학위논문, 서울대학교 대학원, 2005

9) ASHRAE Transactions 1973:82(Part 1), pp.122-134

표 2. 시뮬레이션 기본조건

구분	내용	
온도조건	외기온도 : $-11.3^\circ C$ 실내온도 : $22^\circ C$ 복도, 계단실, 샤프트 온도 : $15^\circ C$	
오염물질	실내 CO (Generation rate) : 300 mg/h 외기 CO 농도 : $1.47 [\text{ppm}]$	
기밀성능 조건 (상당누기 면적)	외피	$2.1 \text{ cm}^2/\text{m}^2$
	도어	엘리베이터도어 : $325 \text{ cm}^2/\text{item}$ 계단실도어 : $120 \text{ cm}^2/\text{item}$ 1층 현관문 : $70 \text{ cm}^2/\text{item}$ Room-door(세대현관) : $23 \text{ cm}^2/\text{item}$

3.3 시뮬레이션 결과

대상 건물의 시뮬레이션의 결과는 그림4 ~ 그림5 와 같다. 그림4에서는 대상건물의 압력 분포(ΔP)를 나타내며, 그림5에서는 공기유동량(m^3/h)을 나타낸다.

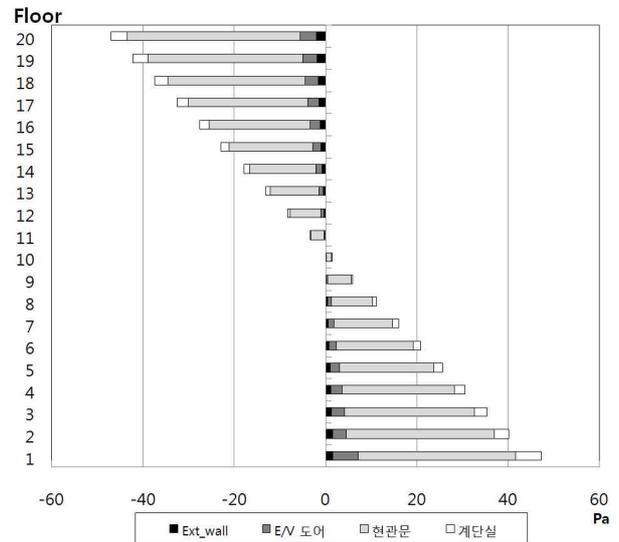


그림 4. 대상건물 압력분포

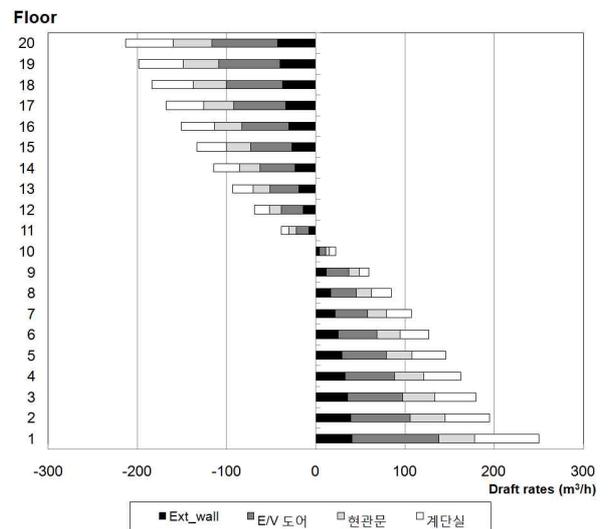


그림 5. 대상건물 공기유동량 (m^3/h)

그림6은 대상건물의 높이에 따른 각 세대별 오염물질 농도분포를 보이고 있다. 그림6에서 1F는 저층부를, 10F는 중성대를, 20F는 상층부를 보여준다. 그 결과 1F에서 외기가 유입되어(40.5 m³/h, 1.47 ppm) 실내오염농도 7.83 [ppm]으로 가장 낮은 오염농도를 보인다. 이때, 세대의 오염된 공기(40.5 m³/h, 7.83 ppm)가 홀로 유입되고, 홀에서 외기(88.63 m³/h, 1.47 ppm)와 혼합하여 4.51 [ppm]으로 나타났다. 홀의 오염된 공기(4.51 ppm)는 다시 계단실(72.18 m³/h)과 엘리베이터 샤프트(97.46 m³/h)로 유입되어 각각 상층부로 이동하게 된다.

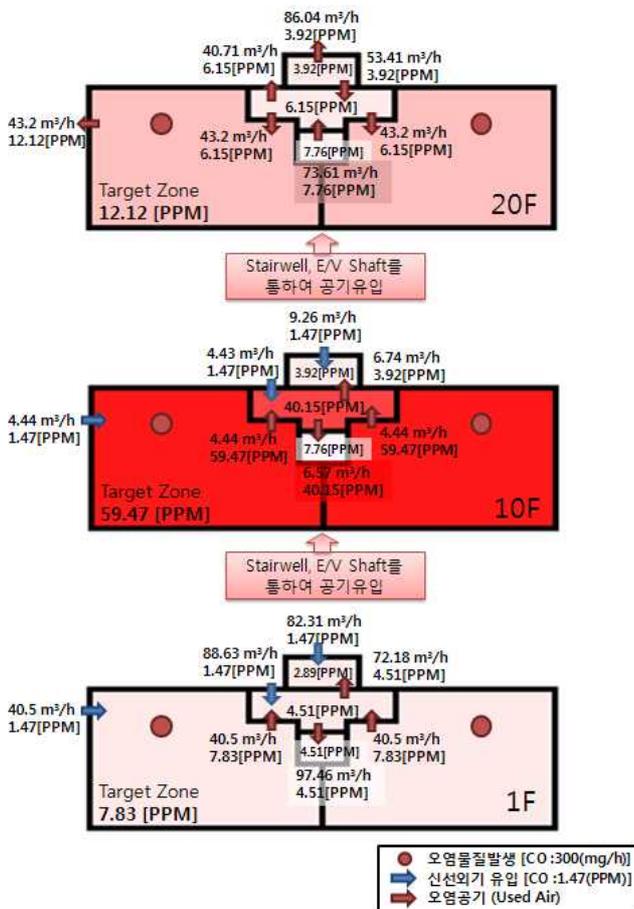


그림 6. 높이에 따른 오염물질 분포 특성

10F의 세대에서는 실내오염농도를 결정짓는 주요요소인 공기유동량에 의해서 가장 높은 농도(59.47 ppm)을 보여준다. 이는 실내오염농도가 식(3)에서 알 수 있듯이 공기유동량, 오염물질 발생정도, 오염물질 유입량, 오염물질 배출량으로 결정되는데, 본 시뮬레이션에서는 오염물질 발생정도가 모두 동일한 상태로 가정하였기 때문에, 공기유동량이 가장 적은 10F에서 가장 높은 오염물질 농도를 보여준다.

20F의 경우, 계단실(Stairwell)을 통해 하층부에서 유입된 공기 (54.41 m³/h, 3.92 ppm)와 E/V 샤프트를 통해 하층부에서 유입된 공기(73.61 m³/h, 7.76 ppm)가 홀에서 혼합되어 오염된 공기(6.15 ppm)가 43.51 m³/h의 양으로

세대 내부로 유입된다. 이때 20F에서의 공기유동량은 43.51 m³/h 으로 1F에서 유입되는 40.5 m³/h 보다 많지만, 오염된 공기(6.15 ppm)가 유입되므로 1F보다 실내 농도가 높게 형성됨을 확인할 수 있다.

그림7의 세대내 오염물질농도분포를 보면, 각 세대에 유입되는 공기의 오염물질 농도에 따라 실내 오염물질 농도가 각각 어떻게 분포하는지를 보여준다.

즉, 연돌효과와 공기유동 특성으로 인하여 중성대 하부에서 오염된 공기가 중성대 상부로 유입되어 중성대 상부에서 상대적으로 실내 농도가 높게 나타나며, 중성대 부근에서는 유입되는 공기량이 적어 실내에서 발생한 오염물질이 배출되지 못하여 실내 농도가 높게 형성됨을 알 수 있다.

결론적으로, 각 세대에 동일한 양의 오염물질(CO)이 발생하더라도, 연돌효과에 의한 수직적 공기이동으로 수직적 세대별로 오염물질농도가 다르게 나타난다는 것을 알 수 있었다.

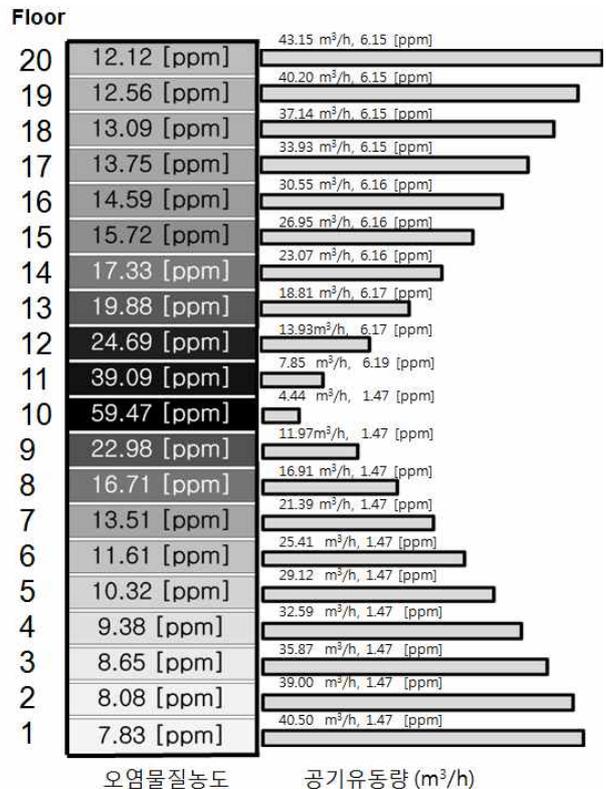


그림 7. 세대내 오염물질농도분포

4. 결론

본 연구를 통해서 고층주거용 건물에서 연돌효과로 인한 수직적 세대별 오염물질농도분포를 검토하였다. 본 연구의 주요 성과는 다음과 같다.

(1) 각 세대의 실내공간에서 동일한 오염물질이 발생하더라도 연돌효과에 의한 공기유동 특성에 의해서 각 세대에서 발생된 오염물질이 이동하기 때문에 결국 각 층

의 실내 오염농도는 서로 상이하게 분포함을 확인할 수 있었다.

(2) 세대로 분포되는 오염물질 농도의 경우, 실내 공기 유동량에 의해서 결정되므로, 연돌효과에 의한 공기유동 특성상 공기유동량이 가장 적게 나타나는 중성대 부근에서 실내 오염농도가 가장 높게 나타났다.

(3) 중성대 상부의 경우 중성대 하부와 비교하여 동일한 공기유동량에 비하여 높은 실내 농도분포를 보였는데 이것은 하부 층에서 발생한 오염물질이 샤프트나 계단실의 수직공간을 통해 상층부로 유입되는 연돌효과의 공기유동 특성 때문임을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부 우수연구센터 육성사업인 한양대학교 친환경 건축 연구센터의 지원으로 수행되었음. (R11-2005-056-02004-0)

참고문헌

1. 조재훈 외, 사례연구를 통한 고층건물에서의 연돌효과 실측 및 저감방안, 대한건축학회논문집 계획계 18권 7호(통권 165호), 2002, pp. 169-176.
2. 이광호 외, 초고층 주상복합아파트의 기밀 성능 및 연돌효과 특성에 관한 연구, 대한건축학회논문집 계획계 21권 12호(통권206호), 2005, pp. 279-286.
3. Doosam Song et. al. (2007), A Prediction of the Indoor Air Movement and Contaminant Concentration in a Multi-Room Condition, International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, Vol. 15-3, pp. 137-146.
4. 김광호 외, 초고층 공동주택의 스택효과가 단위주거에서 코어로의 냄새확산에 미치는 영향 분석, 대한건축학회논문집 계획계 제23권 제9호(통권227호), 2007, pp.129-138.
5. Sing Lee, et. al. (2005), The Experience of SARS-related Stigma at Amoy Gardens, Social Science & Medicine, Vol. 61, pp. 2038-2046.
6. Dols, W. S, Walton, G. N, Denton, K. R. (2000). CONTAMW 1.0 User Manual, National Institute of Standards and Technology, 2000, pp.111-115
7. 조재훈, 고층 주거건물에서 연돌효과로 인한 압력분포 예측 및 평가, 박사학위논문, 서울대학교 대학원, 2005
8. ASHRAE Transactions 1973;82(Part 1), pp.122-134

투고(접수)일자: 2010년 6월 1일

심사일자: 2010년 6월 3일

게재 확정일자: 2010년 6월 14일