

초고층 주거건물에서 굴뚝효과와 외풍영향에 인한 실내 환기 기류해석 및 평가에 관한 연구

김 치 완, 임 태 건*, 안 영 철**

LG전자, *부산대학교 건축공학과

A Numerical Analysis on the Indoor Air Ventilation by Stack Effect and Outdoor Wind in a High-rise Residential Building

Chiwan Kim, Taekun Lim*, Youngchull Ahn**

CAC Laboratory, LG Electronics, Changwon 641-713, Korea

*Department of Architectural Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

(Received March 25, 2011; revision received November 3, 2011)

ABSTRACT: The purpose of this study is to analyze and evaluate the 3 types of indoor ventilation methods such as natural, mechanical, and hybrid ventilation in high-rise building which is affected by stack effect and outdoor air pressure. For the evaluation of the ventilation capacity, CFD simulation was performed in a typical high-rise residential building. The results of the simulations are as follows : 1) Natural ventilation method is not enough to the regulation. 2) In case of mechanical ventilation, congested area is occurred but meets the regulation. 3) In case of hybrid ventilation with stack effect, all the areas of indoor meet the regulation and congested area is reduced. 4) In case of high-rise building, the differences of ventilation rate among houses in the building are not large because the mechanical ventilation is main factor.

Key words: High-rise Building(초고층 건물), Stack effect(굴뚝효과), Natural ventilation system(자연환기장치), Airflow analysis(공기유동 분석)

기 호 설 명

$C1, C2, C\mu$: Std k- ϵ 모델 상수
 Dh : 수력직경, $4A/P$ [m]
 h : 열전달계수 [W/m^2K]
 k : 난류 운동에너지
 u, v, w : 속도 성분

ϵ : 난류 소산에너지
 μ : 점성 계수 [$kg/m \cdot s$]
 η : Kinematic viscosity [mm^2/s]
 ρ : 밀도 [kg/m^3]
 σ : 모델 상수

1. 서 론

현대인의 경우 실내에서 생활하는 시간이 전체의 80~90% 이상이며, 밀폐된 공간 내에서 오염물질이 제거되지 못하고 실내에 누적될 가능성이 매우 높아 실내 재실자에게 심각한 영향을 줄 수 있다. 실내 공기의 오염원은 재실자, 건물의 외기, 토양, 건축자재 및 건물 내 기기 등이다. 특히 재실자는 실

그리스 문자

ν : 동점성 계수

† Corresponding author

Tel.: +82-51-510-2492; fax: +82-51-514-2230

E-mail address: ycahn@pusan.ac.kr

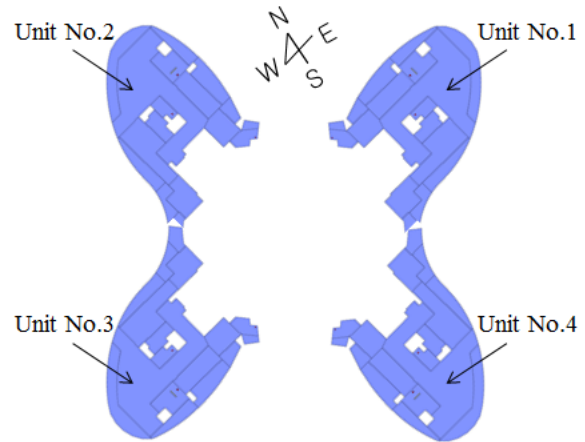
내공기의 가장 큰 오염원이므로 여러 사람이 이용하는 다중 이용 시설에서의 환기는 거주자의 건강 및 일의 능력에 관련된 매우 중요한 요소이다. 이에 따라 국토해양부에서는 “건축물의 설비기준 등에 관한 규칙 제11조”를 통해 다중이용시설의 경우 시간당 0.7회 이상의 환기가 이루어지도록 자연환기 및 기계환기 설비를 갖추도록 의무화하고 있다.⁽¹⁾

건축물에서의 환기 성능을 검증하기 위한 방법은 실물실험, 모형실험 및 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 통한 수치모사 등이 있으며, CFD를 이용한 수치모사의 경우 실물실험이나 모형실험에 비해 시간과 비용을 크게 절약할 수 있다. 자연환기 설비는 기계를 이용한 강제환기가 아닌 건축물 주변의 자연환경(풍향, 풍속, 일사, 건물과 주변 자연환경의 축열효과, 건물 배치 등)을 이용하는 설비이다. 따라서 자연환기의 성능을 예측하려면 자연환기에 영향을 주는 각각의 인자들을 종합적으로 검토하여 자연환기 성능을 예측하여야 한다. 기계환기설비에 의한 실내 기류 연구는 현재까지 많이 진행되어 왔다. 특히, 주방 환기 시스템과 관련하여 많은 연구가 이루어졌다.⁽²⁻³⁾ 그러나 실내 전체 공간의 환기나 상시 환기에 관한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 또한 자연 환기와 기계환기가 혼합된 하이브리드 환기 시스템에 대한 실내 환기 및 내부 기류 조사도 매우 부족하다.

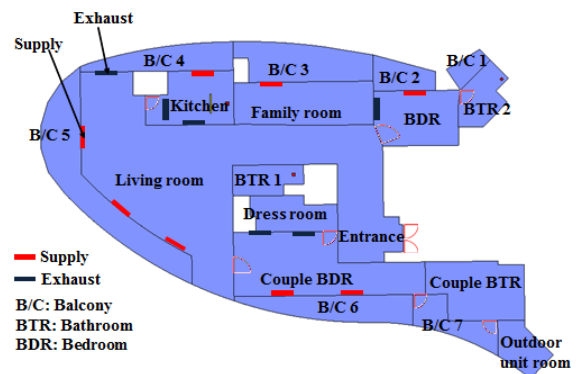
따라서 본 연구에서는 부산 해운대에 위치한 D 건설사의 초고층 주거건물에서의 자연 환기 및 강제 환기 방식에 따른 성능을 CFD를 이용하여 예측하고, 이를 통해 환기 성능을 검토하고자 하였다. 또한 자연 환기 및 강제 환기가 혼합된 하이브리드 환기도 고려하며, 굴뚝효과가 환기에 미치는 영향에 대하여도 파악하였다.

Table 1 Air ventilation conditions of unit household

Room	Supply		Exhaust	
	No.	Rate (CMH)	No.	Rate (CMH)
Living room	3	125	1	125
Kitchen	1	125	2	250
Couple bedroom	2	100	2	100
Family room	1	100	-	-
Bedroom	1	100	1	100



(a) 80th floor plan



(b) Floor plan of an unit household

Fig. 1 Floor plan of target building.

2. 해석 대상 및 수치해석 방법

본 연구에서 실내 기류는 Fig. 1(a)와 같이 부산 해운대에 위치한 D건설사의 초고층 주거건물 3개 동 가운데 대표적으로 A동의 최고층인 80층 4세대에서만 해석하였으며, 단일 세대의 평면도는 Fig. 1(b)과 같다. 단일 세대에는 Table 1과 같이 정풍량의 급기구와 배기구가 설치되어 있다.

2.1 해석조건 및 지배방정식

본 연구에서 해석모델 내의 유동 특성을 해석하기 위하여 도입한 가정은 다음과 같다.

- (1) 유체의 흐름은 3차원 비정상상태, 비압축성 난류 유동이다.
- (2) 작동 유체는 단상이며 물성치는 변하지 않는다.
- (3) 현관문과 화장실문을 제외한 모든 내부 출입문은 열려 있다.

난류 유동을 해석하기 위해 Standard $k-\epsilon$ 모델을 사용하였으며 지배방정식으로 연속방정식, 운동량 방정식, 난류운동량 에너지 방정식, 난류운동량 에너지 소산을 방정식을 사용하였다.

환기성능을 검증하기 위해서 본 연구에서는 공기령(Age of air)을 도입하였으며 아래와 같은 추적가스 감쇄법(Tracer gas decay method)을 사용하였다.

$$\frac{\partial(\rho w_{\alpha_2})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i w_{\alpha_2}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho D + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial w_{\alpha_2}}{\partial x_i} \quad (1)$$

여기서, w_{CO_2} 는 CO₂의 질량 분율이다. 해석 시 CO₂ 농도의 초기 조건은 선행연구⁽⁴⁾를 참조하여 거주인원 1인당 약 500 ppm씩 5인 거주시 2500 ppm 이 전 공간에 균일하게 퍼져 있는 것으로 설정하였으며, 유입 공기의 농도는 일반 대기 농도인 300 ppm을 사용하였다. 또한 적정 환기량 계산 시 CO₂ 농도는 다중 이용 시설 실내 환기 기준인 1000 ppm 이하로 하였다.

(4) 급기환과 배기환의 경계 조건

급기환 :

$$\dot{m} = \dot{m}_{in}, k_{in} = 0.01u_{in}^2, \epsilon_{in} = \frac{C_{\mu}k_{in}^{1.5}}{0.05D_{h,in}} \quad (2)$$

배기환 :

$$\dot{m} = \dot{m}_{out}, \frac{\partial k}{\partial n} = \frac{\partial \epsilon}{\partial n} = \frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad (3)$$

(5) 유체와 고체의 경계면

거주지 바닥, 천장 및 벽에서는 다음과 같은 점성 조건을 사용하였다.

$$u_{wall} = v_{wall} = w_{wall} = 0 \quad (4)$$

(6) 외벽의 경계 조건 및 기밀도

외풍 해석을 통하여 얻어진 외벽의 공기압력은 선행연구⁽⁵⁾ 결과를 인용하여 사용하였으며 각 부위의 기밀도 값은 Table 2에 나타내었다.

2.2 수치 해석 방법

수치 해석 시 압력과 속도를 결합하여 유동장을 풀기 위해 SIMPLE 알고리즘을 선택하였으며, 비정

Table 2 Air tightness values in each parts

	Elements	Air tightness
Outdoor Window	Robby(@75Pa)	4.1 cm ³ /m ²
	Residence(@75Pa)	1.51 cm ³ /m ²
Door	Residence(@10Pa)	70 cm ³ /m ²
	Elevator(@10Pa)	325 cm ³ /m ²
	Stair hall(@10Pa)	120 cm ³ /m ²
	Outdoor unit room(@10Pa)	23 cm ³ /m ²
	Swing(@50Pa)	430 CMH
	Revolving(@50Pa)	73 CMH

상상태 해석을 위하여 시간은 2계 암시적 방법(2nd order implicit scheme)을 사용하였다. 각 지배방정식의 대류항(Convective term)은 Bounded central difference scheme을 이용하여 이산화 하였다. 반복 계산 시 종속 변수들의 수렴 정도는 종속 변수의 상대 오차의 최대값이 연속 방정식, 운동량 방정식, 난류 방정식 및 에너지 방정식의 경우 10⁻⁵이하일 때 수렴된 것으로 판정하였다. 격자 의존성 검사를 실시하여 해의 정확성, 수렴성 및 계산 시간을 고려하여 격자수를 선택하였고 계산의 정확도를 높이기 위해 경계면 부근의 격자를 조밀하게 하였다.

3. 결과 및 고찰

수치해석을 통해 부산 해운대 D건설사의 초고층 주거건물 A동 80층에서의 실내 기류를 분석하였으며, 자연 환기, 기계 환기 및 하이브리드 환기에 따른 기류 및 환기 성능뿐만 아니라 굴뚝 효과 영향을 고려하여 실내 기류를 분석하였다.

3.1 자연 환기, 기계 환기, 하이브리드 환기 비교

환기 시스템에 따른 실내 기류 및 환기 성능을 비교하기 위하여 겨울철 북서풍이 불 경우 자연 환기, 기계 환기, 하이브리드 환기, 굴뚝 효과를 고려한 하이브리드 환기에 대해 조사하였다.

Fig. 2는 겨울철 북서풍일 때, 자연 환기시 세대 내의 바닥으로부터 1.0 m(거주자가 앉아 있을 때 호흡선)에서의 기류 분포이다. 공기 유속은 난방시에는 0.15 m/s, 비난방시에는 0.25 m/s 이상일 때 재실자에게 불쾌감을 줄 수 있다고 알려져 있다. 본 연구의 경우 자연 환기시 호흡선에서의 최대 유속

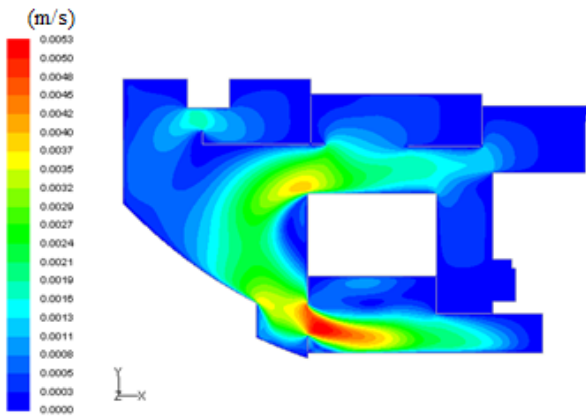


Fig. 2 Air velocities at the respiration level under natural ventilation.

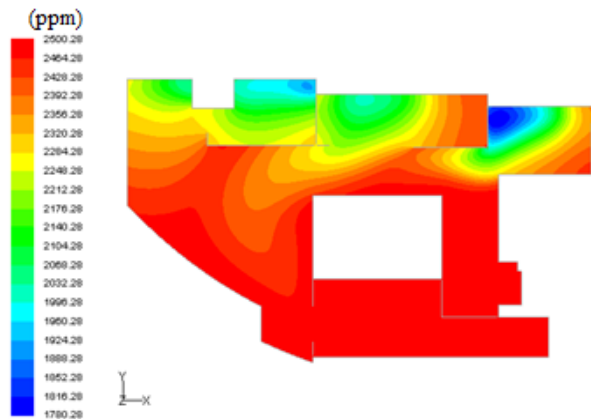


Fig. 3 CO₂ concentration under natural ventilation(1hr 25min later).

이 0.006 m/s를 넘지 않으므로 재실자에게 큰 불편감을 주지는 않는다. 실내 환기 횟수는 시간당 0.7 회를 만족하여야 하므로 약 1시간 25분 후에는 환기 횟수가 1회가 되어야 한다. 따라서 1시간 25분 후의 CO₂ 농도 변화를 Fig. 3과 같이 분석하였다. 자연 환기시 1시간 25분이 지나도 거주지 평균 CO₂ 농도는 2,345 ppm으로 거주지 모든 구역에서 기준 농도인 1000 ppm 이하를 만족하지 못한다. 따라서 본 초고층 건물에서는 자연 환기만으로는 요구 환기량을 만족할 수 없는 것으로 분석되었으며 자연 환기에 굴뚝 효과를 적용하여 환기 성능을 Fig. 4와 같이 알아보았다. 굴뚝 효과 고려시 복도에서의 침기에 의해 굴뚝 효과를 고려하지 않았을 때보다 거주지 평균 CO₂ 농도가 1,989 ppm으로 환기 성능은 좋지만, 이 또한 요구 환기량을 만족하지 못하는 것으로 파악되었다.

기계 환기만을 가동할 경우에는 모든 외벽의 개

구부는 없다고 가정하여 내부를 밀폐하고 급기부와 배기부만을 가동하는 것으로 하여 분석하였다. Fig. 5는 기계 환기일 때 호흡선에서의 기류 분포이다. 호흡선에서의 유속은 대부분 0.025 m/s 이하이며 각 급기부 위치에서 0.16 m/s로 다소 빠른 유속을 보이나 거주자의 쾌적성에는 영향을 미치지 않는다. Fig. 6에 나타낸 바와 같이 1시간 25분 후 평균 CO₂ 농도는 583 ppm으로 요구 환기량을 충분히 만족시키는 것으로 분석되었으며, 가족실과 현관 부근 일부에서 기류의 국부 정체 지역이 생겨 CO₂ 농도가 국소적으로 1,000 ppm 이상의 수치를 보이는 것으로 분석되었다.

Fig. 7에는 자연 환기와 기계 환기를 결합한 하이브리드 환기에 대한 기류 분석결과를 나타내었다. 자연 환기와 기계 환기를 결합했을 때 호흡선에서의 최대 유속은 0.17 m/s로 기계 환기 시 최대 유속보다 조금 크나 기류 분포는 기계 환기만을 수행했을 경우와 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는 자연 환기시 유속이 매우 낮기 때문이며, 호흡선에서의 기류는 기계 환기에 의한 영향이 절대적이기 때문이다. Fig. 8에 나타낸 1시간 25분 후 평균 CO₂ 농도는 575 ppm으로 요구 환기량을 만족하며, 기계 환기만 수행한 경우보다 다소 우수한 환기 성능을 보인다. 거주지 각 구역에서의 CO₂ 농도도 기계 환기시보다 개선되었으며, 특히 가족실에서의 외부 침기를 통해 환기 문제가 개선됨을 확인하였다. 그러나 현관에서의 국소적인 기류 정체로 인해 1,900 ppm 정도로 여전히 높은 CO₂ 농도를 보인다.

하이브리드 환기에 굴뚝 효과를 적용하기 위해 외벽의 경계 조건으로 굴뚝 효과에 의한 압력값을 적용하였다. 굴뚝 효과 영향을 고려하였을 경우 호흡선에서의 유속은 굴뚝 효과를 적용하지 않은 하이브리드 환기와 큰 차이 없었으며 1시간 25분 후 평균 CO₂ 농도는 585 ppm으로 굴뚝효과를 적용하지 않은 하이브리드 환기보다 성능이 떨어지는 것으로 나타났다. 이는 외벽에서의 침기와 누기 효과를 굴뚝 효과가 상쇄시키기 때문이며, 이 경우 현관에서는 복도와 내부에 약 15 Pa의 압력차이를 유발하여 복도에서 실내로 공기가 유입됨에 따라 Fig. 9와 같이 현관의 침기에 의해 현관 부근에서의 기류 정체 현상은 없어지고 모든 환기 시스템 중 각 구역에 따른 CO₂ 농도 편차는 가장 작은 것으로 분석되었고 따라서 모든 구역에서 요구 환기량을 만족하는 것으로 나타났다.

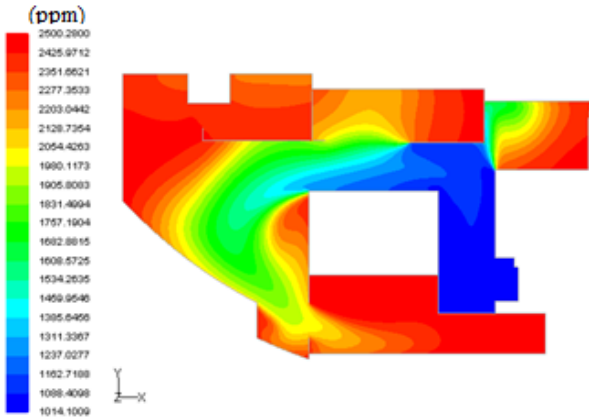


Fig. 4 CO₂ concentration under natural ventilation with stack effect(1hr 25min later).

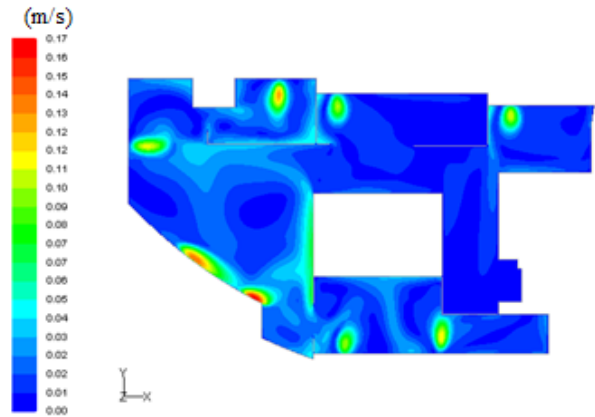


Fig. 7 Air velocities at the respiration level under hybrid ventilation.

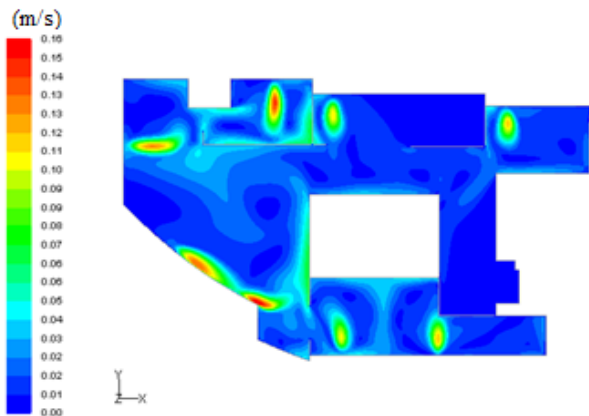


Fig. 5 Air velocities at the respiration level under mechanical ventilation.

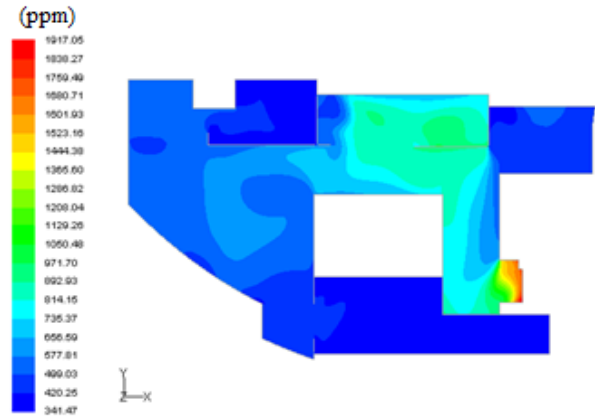


Fig. 8 CO₂ concentration under hybrid ventilation(1hr 25min later).

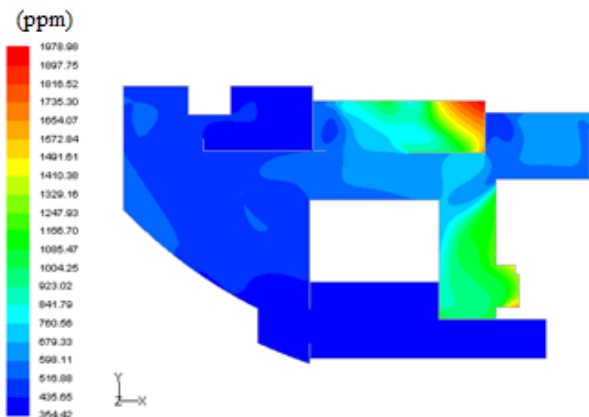


Fig. 6 CO₂ concentration under mechanical ventilation(1hr 25min later).

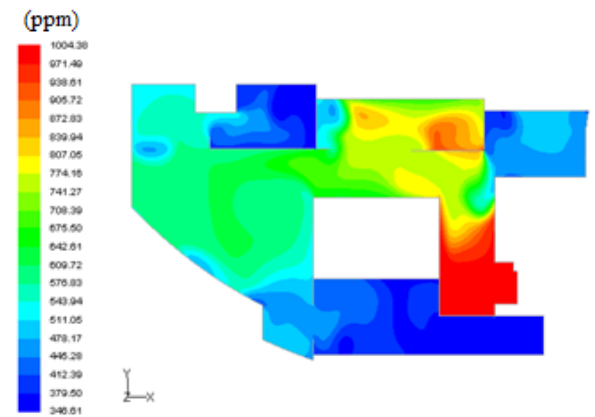


Fig. 9 CO₂ concentration under hybrid ventilation with stack effect(1hr 25min later).

각 환기 시스템에 따른 환기 성능 및 호흡선에서의 기류 분포를 예측해본 결과, 호흡선에서의 기류

분포는 자연 환기를 제외한 대부분의 환기 시스템에서 유사한 분포를 보였다. 이는 자연환기의 경우

건물 외부의 다소 강한 음압의 형성에 의해 실내 기류가 유출되며 일어나기 때문에 상당히 제한적으로 환기가 발생하게 되며 기계환기의 경우는 실내에 약한 음압이 형성되도록 하여 외부로 기류가 충분한 양으로 원활히 배출되기 때문인 것으로 분석된다. 결국 호흡선에서의 유속은 외풍이나 굴뚝 효과에 의한 영향은 크지 않고 기계 환기에 의한 영향이 절대적이며, 전체 환기 성능은 하이브리드 환기가 가장 뛰어난 것으로 나타났다. 그러나 하이브리드 환기도 국소적으로 요구 환기량을 만족시키지 못하는 문제가 있으며, 굴뚝 효과를 고려한 하이브리드 환기의 경우에 그 성능은 하이브리드 환기만 고려한 경우보다 떨어지지만 호흡선 모든 구역에서 요구 환기량을 만족하는 것으로 나타났다.

3.2 풍향에 따른 세대별 기류분포

고층 건물에서 풍향에 따른 환기 시스템 검증을 위하여 풍향별 굴뚝효과를 적용하여 하이브리드 환기 성능에 대해 알아보았다. 각 세대의 환기 성능은 1시간 25분 후의 CO₂ 농도를 통해 비교하였다.

겨울철 서풍일 때, A동 각 세대별 환기 성능은 Fig. 10과 같다. A동 80층에서 3번 세대는 서풍을 그대로 받기 때문에 층돌부가 되며 이에 따라 3번 세대와 2번 세대 사이의 벽에서 공기가 유입되고 후류부인 4번 세대 사이에서 유출된다. 이는 층돌부에서 침기량을 늘리고 후류부에서 누기량을 늘려서 3번 세대의 환기 성능을 좋게 한다. 따라서 3번 세대는 다른 세대보다 환기 성능이 우수하였다.

Fig. 11은 겨울철 북서풍일 때, 각 세대별 1시간 25분 후 CO₂ 농도이다. 2번 세대는 북서풍에 층돌하고 2번 세대 대부분의 외벽에서 유체가 유입된다. 1번 세대 배면의 후류 영향으로 1번 세대와 2번 세대 사이의 외벽에서 침기가, 1번 세대와 4번 세대 사이에서는 누기가 발생한다. 이는 다른 세대에 비해 2번 세대의 환기 성능이 우수한 결과로 나타났으며, 겨울철 서풍과 북서풍의 영향으로 층돌 세대에서는 외기의 층돌부와 후류부가 명확히 나타나 외기의 유출입을 원활하게 하여 환기 성능이 뛰어난 것으로 분석되었다. 그러나 하이브리드 환기의 경우 기계 환기가 요구 환기량을 만족하므로 각 세대별 환기량에는 큰 차이가 없다. 따라서 초고층 건물의 경우 각 세대별 기계 환기의 작동이 더욱 중요하다.

여름철 남남서풍일 때, 3번 세대와 4번 세대 사이

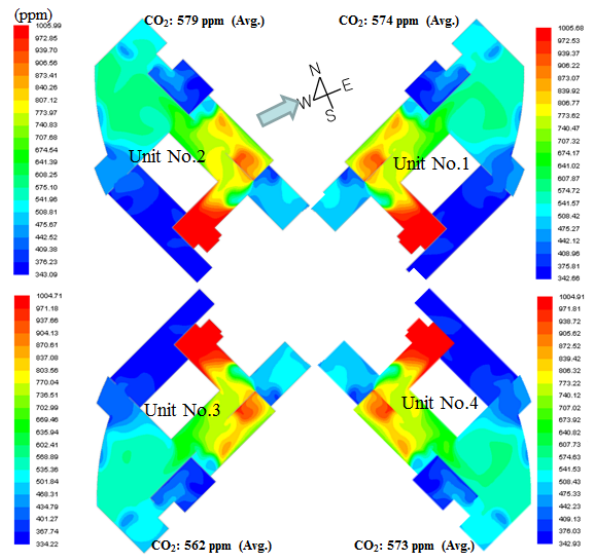


Fig. 10 CO₂ concentration at the 80th floor under westerly wind.

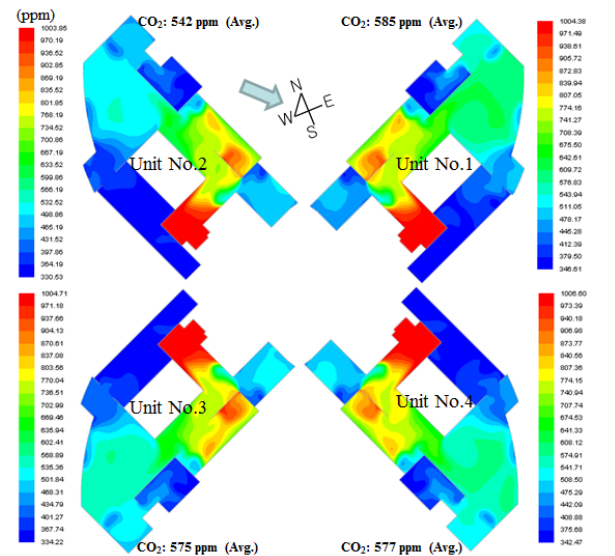


Fig. 11 CO₂ concentration at the 80th floor under northeasterly wind.

에 기류가 층돌하고 1번 세대와 2번 세대에는 후류가 발달하기 때문에 Fig. 12와 같이 3번과 4번 세대의 환기성능이 뛰어난 것을 알 수 있으며, Fig. 13과 같은 북동풍일 때는 층돌부인 1번 세대의 모든 면에서 외기가 유입되어 1번 세대의 환기 성능이 매우 뛰어났다. 대체적으로 여름철 각 세대별 환기 성능이 겨울철보다 더 좋으며, 이는 내부의 오염된 공기가 북도로 빠져나가기 때문이다. 그러나 부산 지역의 경우 여름철 풍향이 남남서와 북동풍으로

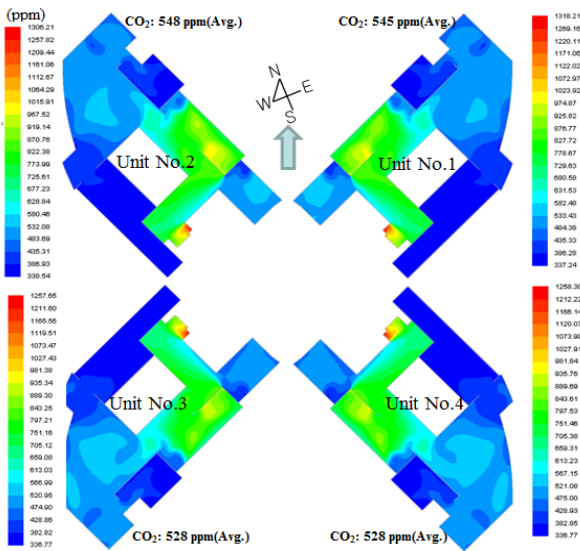


Fig. 12 CO₂ concentration at the 80th floor under south westerly wind.

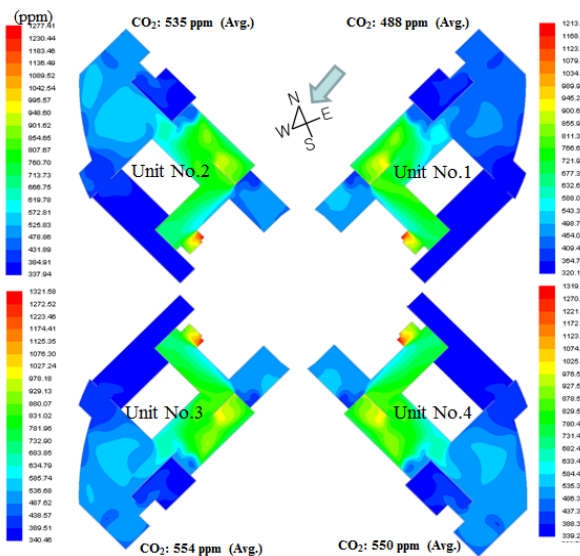


Fig. 13 CO₂ concentration at the 80th floor under northeasterly wind.

수시로 변화하기 때문에 특정한 환기특성을 정의하기는 어려울 것으로 판단된다.

풍향에 따른 각 세대별 환기 성능을 분석한 결과 대부분 기류 충돌부 세대에서의 환기 성능은 뛰어나며, 배면부 세대의 환기 성능은 이보다 나쁘지만 하이브리드 환기의 경우 기계 환기에 의해 충분한 양의 환기가 이루어지므로 각 세대별 환기 성능의 편차가 크지 않다. 또한 초고층 건물의 경우 기밀도가 높기 때문에 자연 환기 영향도 크지 않은 것으로 분석되었다. 따라서 각 세대별 요구 환기량을 만

족하기 위해서는 기계 환기가 지배적인 영향을 미치므로 적당한 사양의 환기시스템을 각 세대별로 독립적으로 설치하여 운전하는 것이 유리할 것이라 판단된다. 그러나 기계 환기, 하이브리드 환기의 경우 시간당 0.9회의 환기 횟수로 요구 환기량을 훨씬 초과하므로 에너지 절약을 위한 최적 용량 선정이 필요하다.

4. 결 론

부산 해운대 우동에 건설될 D건설사 초고층 주거 건물 80층 A동의 실내 기류를 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) D건설사 80층 주거건물과 같은 초고층 건물의 경우 외벽 기밀도가 매우 높아 자연환기만으로는 요구 환기량을 만족시키지 못한다.
- (2) 기계 환기의 경우, 요구 환기량은 만족하나, 가족실과 현관에서 국소적인 기류 정체가 나타난다.
- (3) 굴뚝 효과를 적용한 하이브리드 환기는 굴뚝 효과를 적용하지 않은 하이브리드 환기보다 침기와 누기의 상쇄 효과로 환기량은 적으나 현관에서의 침기로 인해 국소적인 기류 정체 영역을 감소시켜 모든 구역에서 요구 환기량을 만족하였다.
- (4) 초고층의 경우 자연 환기에 비해 기계 환기가 전체 환기 성능에 미치는 영향이 지배적이기 때문에 풍향에 따라 각 세대별 환기량은 크게 차이 나지 않는다.

D건설사 초고층 주거건물 80층 A동의 실내 기류를 분석한 결과, 자연 환기는 요구 환기량을 만족시킬 수 없었다. 초고층 건물의 경우 풍향에 따라 동일 층의 각 세대별 환기 성능의 큰 차이가 없고, 기계 환기가 환기 성능에 절대적인 영향을 미친다. 따라서 초고층 건물의 경우에는 각 세대 별 동일한 환기량을 확보 및 유지할 수 있는 개별 환기 시스템이 효율적이며, 본 환기 시스템의 경우 기준 환기량을 과도하게 초과하므로 이를 최적화하여 최적 용량을 선정할 필요가 있다.

참고문헌

1. Lee, K. H., Yoon, J. O., and Jeong, J. G., 1997, A study on the standards and methods of natural ventilation considering indoor air quality

- in office building, Journal of Architectural Institute of Korea, Vol. 13, No. 6, pp. 185-195.
2. Smith, V. A. and Donald, J. D., 1997, Minimum energy kitchen ventilation for quick service restaurants, ASHRAE Trans. Part 2, pp. 950-960.
 3. Kim, K. H., Lee, J. H., Park, M. S., and Lee, D. W., 2000, Prediction of the ventilation performance in a kitchen with various locations of gas range and window, Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 12, No. 1, pp. 75-82.
 4. Hwang, J. H., Oh, C. Y., and Kim, M. H., 2006, A prediction of hybrid ventilation system performance in apartment house, Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 18, No. 7, pp. 541-548.
 5. Kim, C., Yang, S., and Ahn, Y., 2011, A numerical analysis on the outside pressure distribution by outdoor wind effect in a high-rise residential building, Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 23, No. 10, pp. 639-645.