

공동주택에서 환기장치류 가동특성에 따른 실내공기질 변화특성에 관한 연구

김 석 근, 이 정 재[†]
동아대학교 대학원, ^{*}동아대학교 건축학부

The Effects to Indoor Air Quality as Ventilation System Operation in Apartment House Using CFD Simulation

Seok-Keun Kim, Jurng-Jae Yee[†]
Graduate School, Dong-A University, Busan 604-714, Korea
^{*}Faculty of Architectural Engineering & Design, Dong-A University, Busan 604-714, Korea
(Received September 22, 2006; revision received December 7, 2006)

ABSTRACT: The purpose of this study is to suggest the effective ventilation strategies and control methods that can minimize energy cost maintaining acceptable IAQ level in apartment house. The effects of the air-cleaning and heat-recovery ventilation system on IAQ under various operating conditions are investigated based on the experimental and CFD analyzed results. The results can be summarized as follows. (1) When a ventilator is not operated, the concentration of several pollutants may highly show in the house even though environment-friendly building materials are applied. Therefore, a mechanical ventilation system is required to obtain proper ventilation. (2) The pollutant concentration is noticeably decreased under air-cleaning/ventilation mode of air-clinic system, however, pollutant of kitchen is stagnant, because fresh air is not carried into the kitchen. (3) When air-clinic system is only equipped at master bedroom and living room, the system does not effectively deliver fresh air throughout the whole house, and then high pollutant concentration is obtained in each room. In contrast, the average pollutant concentration meets the guideline when air-clinic system is installed at each room. (4) The air-cleaning/ventilation mode significantly affects on room ventilation in comparison with ventilation mode only.

Key words: IAQ(Indoor Air Quality, 실내공기질), CFD(Computational Fluid Dynamics, 전산유체역학), Ventilation system(환기장치), Air-cleaning(공기청정)

1. 서 론

환기를 계획적으로 반영하지 못한 최근 고단열,

고기밀 공동주택은 자연환기량의 감소에 따라 외기의 영향을 적게 받아 열적 쾌적성은 증가한 반면, 결로가 발생하여 곰팡이류 발생이 쉬운 고습도 환경이 조성되고, 동시에 실내에 방출되고 있는 HCHO, VOCs, 전자파 등의 유해물질이 실내에 정체할 가능성이 높아 인체로의 영향이 매우 염려스러운 상황이다. 이를 해결하기 위해, 최근

[†] Corresponding author

Tel.: +82-51-200-7609; fax: +82-51-200-7616

E-mail address: jjyee@dau.ac.kr

다양한 종류의 공기청정기 사용이 증가하고 있으나, 이러한 공기청정기가 결코 산소를 만들어 내지는 못하다는 점에 인식하여야 하며, 건강한 주거환경을 조성하기 위해서는 공기청정만이 아니라 산소공급, 습도조절 등을 위해 적절한 외기의 도입이 필요하다.

따라서 실내공기오염의 저감을 위해서는 주요한 오염원으로 작용할 수 있는 건축자재, 부자재 및 내장재 등의 적절한 선택을 통해 실내공간으로의 오염물질 방출자체를 억제하는 방법(source control)과 병행하여 이미 발생되어 실내에 존재하고 있는 공기오염물질을 건축물 외부로 신속히 배출하여 제거(removal control)하거나 실내공기 중의 농도를 희석, 저감(dilution control)시킴으로써 오염물질을 효과적으로 제어할 수 있는 적절한 공기청정 및 환기시스템을 채택하고 이를 효과적으로 적용하는 방법이 매우 중요하다.

그러나 환기량 증가는 필연적으로 에너지소비량을 증가시키는 양면성을 수반하고 있기 때문에 실내공기질을 효과적으로 유지하면서 에너지소비량을 최소화할 수 있는 환기기법에 대한 연구가 진행되고 있으며, 통상적으로 실측 및 시뮬레이션에 의해 평가를 하고 있다.

환기기법 적용에 따른 실내공기질과의 상관관계를 규명한 기존의 시뮬레이션 결과로는 CFD를 활용하여 실내공기질 개선효과를 예측한 것,⁽¹⁾ TRNSYS를 활용하여 실내공기질의 변화 및 냉난방 부하의 변동을 결합하여 예측한 것⁽²⁾과 ESP-r의 네트워크 시뮬레이션 기법을 활용하여 다실 공간의 실간 기류이동 및 그에 따른 오염물질의 확산특성을 예측한 것⁽³⁾ 등이 있다. (2)의 경우 실내공기질과 냉난방부하의 연성하여 예측하였다는 점에서 의의가 있으나, 각 실간 오염농도의 변화를 구현하는 데 한계가 있었으며, (3)의 경우 다실 공간에서의 실간 기류이동 및 오염물질의 변화를 예측하는 점에서는 의의가 있으나, 거주 공간에 전체에 걸쳐 효율적인 환기성능을 확보하기 위해서는 오염원의 위치, 발생강도, 특히 각종 환기장치류의 위치 및 환기량에 따른 상관관계, 환기공기의 온도 및 실내의 열환경 등에 대한 정확한 검토가 이루어져야 한다. CFD 시뮬레이션의 경우 문이 닫혀 있는 실간의 기류 이동 및 오염물질의 변화를 예측하기에는 한계가 있어, 각 실의 문을 전부 개방한 상태에서 해석하게 되나,

거주공간에 다양하게 설치되어 있는 각종 환기장치류의 상관관계에 대한 정밀한 해석이 가능하며, 공동주택의 실내공기질 시험방법에 따르면 실내의 개구부를 개방하고 측정하도록 규정하고 있어 측정치와의 비교 검토가 가능하다.

본 연구는 공동주택에서 실내공기질을 청정하게 유지하면서 환기에 따른 에너지비용을 최소화할 수 있는 효율적인 환기방식 및 제어방법을 제시하기 위해, 공기청정겸용 환기유닛(이하 청정환기시스템), 주방후드, 욕실 배기팬 등이 설치된 공동주택에서 CFD 시뮬레이션을 실시하여 환기장치류의 가동특성에 따른 실내공기질과의 상관관계를 분석하고자 한다.

2. 시뮬레이션 개요

해석대상 공동주택은 2005년 1월 현재 서울시 에 신축중인 아파트로서 총 20층 중 중간세대인 10층이며, Fig. 1은 단위세대 평면, 환기장치 설치 위치를 나타낸다.

그림에 주목하면, 총 1~7의 환기장치가 설치되어 있으며, 이 중 1~4는 청정환기시스템, 5는 주방 후드, 6~7은 욕실 배기팬을 나타낸다. 해석에 사용된 청정환기시스템은 환기 전용, 공기청정 전용, 환기+청정 동시가동의 3가지 모드로 운전이 가능하며, 시스템 내부에는 HCHO 및 VOCs 제거를 위한 전용필터가 내장되어 환기를 실시하지 않고 청정모드만을 가동하여도 실내 HCHO 및

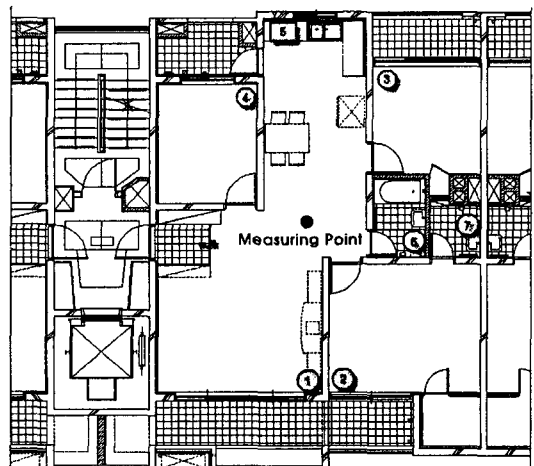


Fig. 1 Layout of the ventilation system.

Table 1 Air volume conditions (CMH) of air-cleaning & ventilation system (ACVS)

Case	Kitchen hood	Living room ACVS		Bed room 1 ACVS		Bed room 2, 3 ACVS		Bathroom fan	
		Ventilation	Air-cleaning	Ventilation	Air-cleaning	Ventilation	Air-cleaning		
Ventilation mode only	Supply	-	65	180	45	90	25	60	-
	Exhaust	290	65	180	45	90	25	60	-
ACVS + Kitchen hood	Supply	-	60	180	40	90	25	60	-
	Exhaust	284	50	180	35	90	25	60	75
ACVS + Kitchen hood + Bathroom fan	Supply	-	60	180	40	90	25	60	-
	Exhaust	282	50	180	35	90	25	60	75

Table 2 Temperature conditions (°C)

Conditions	Temperature
Outdoor air	-11.3
Outdoor direct window	3.1
Outdoor indirect window	6.4
Floor (with heating)	26.0
Ventilation inlet	23.9
Infiltration inlet	-11.3

VOCs를 상당부분 제거 가능하도록 설계되어 있어 환기량의 절감이 가능한 시스템이다.

해석에 앞서 대상 공간의 기밀성능을 측정하여 침기량의 경계조건으로 이용하였고, 동시에 환기장치류의 가동 유무에 따른 실제 급·배기성능에 대한 실측을 선행하였으며,⁽⁴⁾ 그 결과는 Table 1과 같다. 환기장치의 급배기 밸런스 차는 틈새바람으로 간주하였다. 또한, 해석에 사용된 온도 경계 조건은 에너지절약설계기준에 준하여 가정하였으며, Table 2와 같으며, 구체적인 해석 Case와 해석공간 전체에 대한 환기횟수는 Table 3과 같다.

실내 오염물질 항목 중 농도해석물질은 계산의 편의상 대표적인 VOCs 물질 중 톨루엔을 선정하였으며, 방출농도는 건축자재 평균 농도인 벽지의 경우 0.06 mg/m²·h, 바닥재 및 다량의 오염물질이 방사된다고 가정한 드레스룸은 0.6 mg/m²·h를 사용⁽⁵⁾하였다. 농도방출에 관한 설정은 완전확산이라 가정하여 벽지, 바닥재, 드레스룸 전체의 농도발생량을 체적으로 나누어 공간 전체에서 일정량이 계속해서 방출되는 것으로 하였다.

한편, 청정환기시스템 내부의 공기청정 filter 효율은 one-pass 효율을 30%로 가정하여, user define function을 이용하여 code을 작성하였으며, 해석에는 FLUENT 6.22 version 프로그램을 이용하였다.

3. 시뮬레이션 결과

각 해석 case별로 호흡선 높이인 1.6m 지점의 톨루엔 농도분포 및 온도분포 시뮬레이션 결과를 Fig. 2(case 1-5)~Fig. 3(case 6-10)에, 그 상관관계

Table 3 CFD simulation case

Case (ACH)	1 (0.2)	2 (1.7)	3 (0.7)	4 (0.7)	5 (2.3)	6 (3.2)	7 (1.0)	8 (1.0)	9 (0.0)	10 (0.0)
Natural ventilation	○									
Kitchen hood		○			○	○				
Living room Bed room 1 ACVS	Ventilation		○	○	○	○	○	○		
	Air-cleaning			○				○	○	○
Bed room 2 Bed room 3 ACVS	Ventilation						○	○		
	Air-cleaning							○		○
Bathroom fan						○				

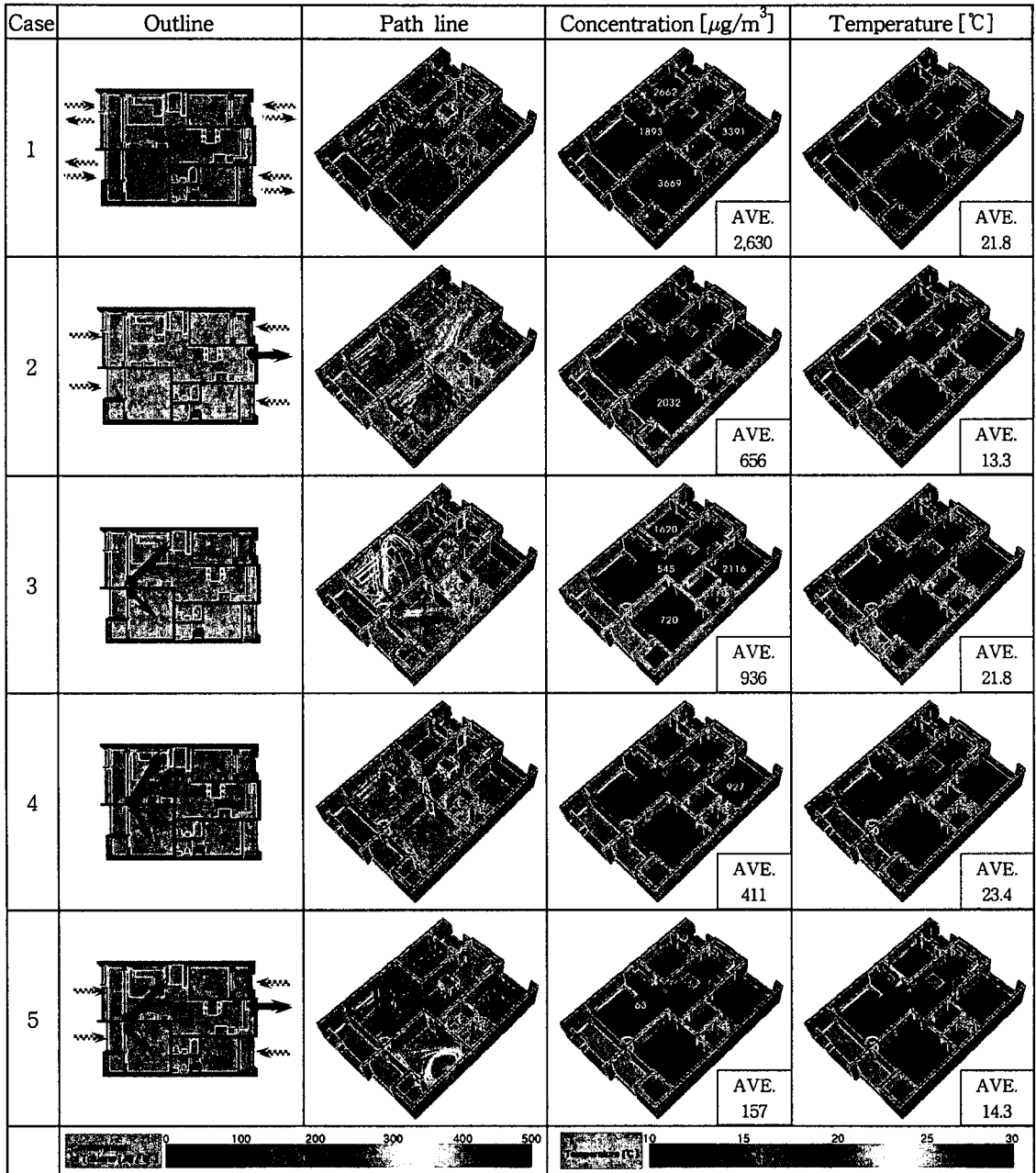


Fig. 2 CFD results for each case (case 1-case 5).

를 Fig. 4에 나타내고 있다.

그림에 주목하면 모든 환기장치를 가동하지 않고 자연환기만을 고려한 case 1에서 실 평균 농도는 $2,630 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났으며, 이는 실내공기질 개선을 위해 상시 일정한 외기도입과 적극적인 기

계환기의 채용이 불가피함을 보여주고 있다.

주방 후드만을 가동한 case 2에서는 실 평균 농도는 $656 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타나, 실내공기질 개선효과는 매우 높았으나, 장시간 후드 가동시 찬 외기의 대량 유입으로 실 평균 온도가 13.3°C 로 저

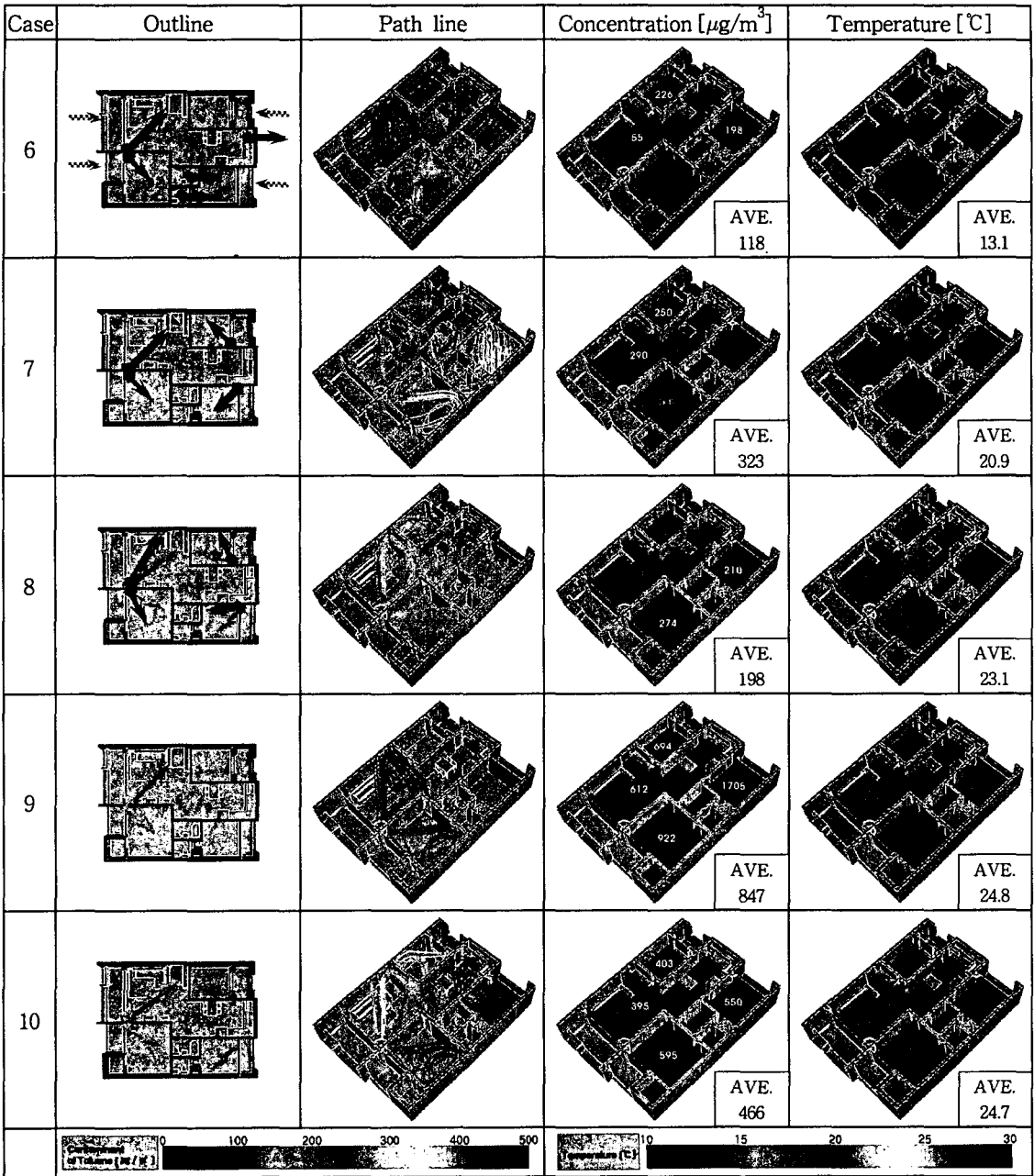


Fig. 3 CFD results for each case (case 6-case 10).

하되어, 많은 난방에너지 손실을 초래하므로 실내 공기질 개선과 더불어 에너지절약을 위하여 전열 교환 환기시스템의 채용 및 보급공기를 통해 외 기유입의 방지가 필요할 것으로 판단된다.

거실, 침실1에 환기모드를 가동하는 case 3에서

의 실 평균 농도는 $936 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 실내공기질 개선효과는 그다지 높지 않았으며, 거실과 침실1에 청정+환기를 가동하는 case 4에서의 평균 농도는 $411 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 실내공기질 개선효과는 case 3에 의해 다소 높게 나타났으나, 두 case 모두 침

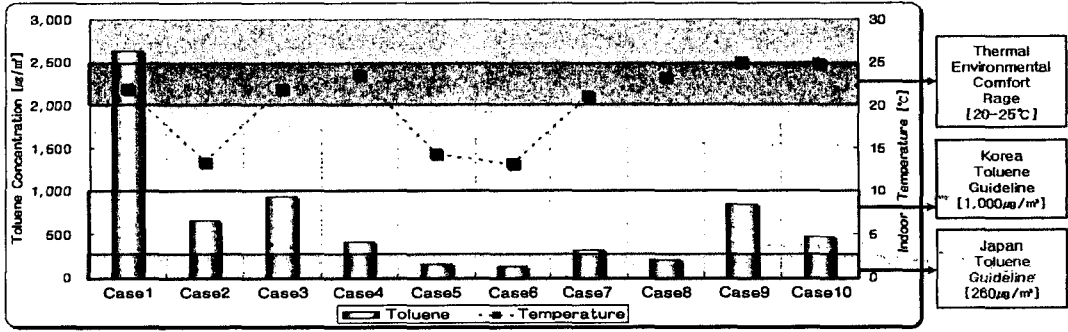


Fig. 4. Relation of indoor temperature and toluene concentration as ventilation system operation.

실2, 3 및 주방에 신선공기가 도달되지 못하여 실내공기질이 개선되지 못하고 있다. 이는 모든 실에 환기장치의 채용이 불가피함을 보여주고 있다.

거실과 침실1에 환기모드와 주방후드를 동시 가동하는 case 5와 거실과 안방에 환기모드와 주방 후드, 욕실 배기팬을 동시 가동하는 case 6에서의 실 평균 농도가 각각 157, 118 µg/m³으로 나타나 실내공기질 개선효과는 매우 높으나, 실 평균 온도가 14.3, 13.3°C로 저하되어 많은 난방에너지 손실을 초래하고 있다. 이를 해소하기 위해서는 동시 급배기 후드시스템의 채용이 필요하다.

한편, case 6에서는 침실1의 욕실 배기팬 가동시 신선외기가 실내로 확산되지 못하고, 욕실로 빠져나가는 것을 볼 수 있는데, 이는 청정환기시스템 설치위치가 기류 유동경로 및 실내 오염물질 배기에 큰 영향을 미친다고 판단할 수 있다.

모든 실에 환기모드를 가동하는 case 7에서의 실 평균 농도는 323 µg/m³으로 나타나 전체적인 실내공기질 개선효과는 매우 높으나, 주방영역은 완전히 개선되지 못하고 오염물질의 농도발생이 높은 침실1에서는 농도정체 영역이 나타났다. 따라서 청정환기시스템 적용시에는 주방 후드를 소풍량으로 배기하는 등의 주방 영역의 공기질 개선방안이 요구된다.

모든 실에 청정+환기모드를 가동하는 case 8은 실 평균 농도가 198 µg/m³으로 공기질 개선효과는 매우 높았으며, 주방영역의 실내공기질도 개선되고 농도발생이 높은 실에서의 농도 정체도 대부분 개선되어 청정과 환기를 동시에 실시할 경우 적은 환기량으로 실내공기질을 개선시킬 수 있다는 것을 입증하고 있다.

거실, 침실1에 청정모드를 가동하는 case 9는 실

평균 농도는 847 µg/m³으로 나타나 공기질 개선효과는 높지 않으나, 주방과 침실2, 3으로 청정공기가 도달하지 못하여 공간 전체적으로 고농도의 분포를 나타내고 있다.

모든 실에 청정모드만을 가동하는 case 10에서의 실 평균 농도는 466 µg/m³으로 공기질 개선효과는 비교적 높으나, 실 전체에 청정풍량이 부족하여 전체적으로 고농도의 분포를 나타내고 있어 청정환기시스템의 청정모드만으로는 실내공기질 개선에 어려움이 있다.

톨루엔 농도분포 및 온도분포의 상관관계를 나타낸 Fig. 4에 주목하면, 친환경 자재를 사용한다 하더라도 기계환기를 실시하지 않고 자연환기에 의존하면(case 1) 톨루엔농도는 아주 높은 분포를 보이고 있으며, 주방후드 가동시(case 2, 5, 6)에는 실내공기질 개선효과는 두드러지나 찬 외기의 유입으로 극도의 실온저하를 초래하고 있어 난방에너지 손실문제와 심각한 cold draft가 발생할 우려가 있다.

톨루엔 농도는 case 1을 제외하고는 모든 case에서 국내 권고치(1,000 µg/m³)를 만족하나, 일본 기준치(260 µg/m³)를 적용할 경우 case 5, 6, 8을 제외하고는 기준치를 초과하고 있다. Case 5, 6은 온열쾌적범위를 벗어나 모든 실에 청정+환기를 실시하는 것(case 8)이 검토 case 중 가장 우수한 실내공기질 개선효과 및 온열환경을 나타냈다.

4. 측정치와 비교

측정은 해석대상 공간과 동일 공간에서 이루어졌으며, 환경부 실내공기질공정시험방법에 의거하여 창, 문을 모두 개방하고 30분 이상 충분히 사

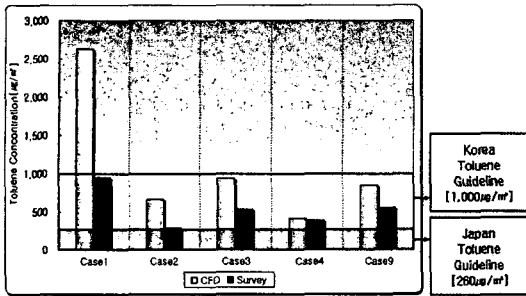


Fig. 5 Comparison CFD with survey result.

전 환기시킨 후, 외부 공기에 접한 창, 문을 모두 닫고 5시간 이상 밀폐상태를 유지한 상태에서 5 가지 가동조건에서(시뮬레이션 case 기준으로 case 1-4, case 9) VOCs 농도를 Fig. 1과 같이 세대 내 중앙지점에서 30분간 시료를 채취하였으며 GC/MS 로 분석하였다.

Fig. 5는 CFD 해석결과와 측정결과를 비교한 것으로, 그림에 주목하면 자연환기만을 고려한 case 1을 제외하고는 비교적 유사한 결과를 보이고 있다. 이는 해석공간 전체에 대한 오염물질 평균 농도를 비교한 것으로 향후 보다 정확한 측정치를 얻기 위해서는 CFD 해석을 통한 실내공기질 분포를 예측한 후 다(多)점에 의한 측정을 하여 측정점 선정에 따른 농도값의 오차를 줄여야 할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 청정환기시스템이 적용된 아파트에서 각종 환기관련 장치의 가동 유무에 따른 실내공기질 개선효과를 CFD 시뮬레이션을 실시하여 정량적으로 평가함으로써 환기장치류 가동 특성에 따른 실내공기질 개선효과 및 상관관계를 정량적으로 검토하였다. 본 연구에서 도출된 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 친환경 건축자재를 사용하더라도 환기시스템을 가동하지 않은 경우, 오염물질의 농도분포가 높게 형성될 수 있으므로 상시 일정한 환기량이 확보되는 기계환기의 도입이 필요하다.
- (2) 청정환기시스템만을 가동하는 경우, 전체적으로 오염물질 개선효과는 뚜렷하나 주방 존으로 외기가 도달되지 않아 일부영역에서 오염물질이 정체할 가능성이 있다. 한편, 주방후드와 청정환

기시스템을 동시 가동하는 경우, 주방 존에서의 오염물질 정체를 개선시키는 효과는 있으나 과도한 외기유입으로 실온저하(난방에너지 손실) 및 콜드 드래프트 문제가 발생할 우려가 있으므로 이를 해결하기 위해서는 주방후드 미가동시에도 소풍량의 상시배기가 되도록 운전하는 것이 필요하며, 주방후드 가동시에는 보급공기식 후드시스템을 설치하여 운전하는 것이 필요하리라 판단된다.

- (3) 침실과 거실에만 청정환기시스템을 설치하는 경우, 신선공기가 세대 전체로 도달하지 못하여 실의 오염농도는 높게 나타났다(환기, 환기+청정모드 공히). 반면, 각 실에 청정환기시스템을 설치하여 실별로 환기를 실시하는 경우 평균 농도는 기준치를 모두 만족하고 있기 때문에 환기시스템은 실별로 설치하는 것이 바람직하다.
- (4) 환기+청정모드로 운전하는 경우 환기 단독 운전보다 탁월한 환기효과를 나타내고 있다.

참고문헌

1. Yee, J. J., Lee, S. H., Kim, Y. K. and Park, S. K., 2005, CFD simulation on indoor air quality in apartment housing equipped for total heat exchanger with air cleaning function, Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol. 21, No. 3, pp. 157-164.
2. Song, D. S. and Cho, W. H., 2006, A development of coupled simulation tool to evaluate performance of ventilation system, Korean Journal of Air Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 18, No. 2, pp. 112-121.
3. Song, D. S. and Lee, M. K., 2005, A prediction method for a contaminant transport with air flow in multi-zone, Proceeding of Annual Conference in AIK, pp. 59-62.
4. Kim, S. K., Kim, K. H., Ihm, P. C. and Yee, J. J., 2005, Survey for airtightness and ventilator performance in newly built apartment house, Proceeding of Annual Conference in AIK, pp. 155-158.
5. Kim, Y. D., 2004, A Prediction Method of Optimum Ventilation Rate of Dwelling with Particular Reference to TVOC Emissions, Ph.D. thesis, Yonsei University, Seoul, Korea.