환기량 변화에 따른 신축공동주택의 실내공기질 개선효과 검토

최 석 용, 김 상 희, 이 정 재*†
동아대학교 대학원, *동아대학교 건축학부

The Effect on Indoor Air Quality Improvement by Ventilation Rate in Newly Built Apartment

Seok-Yong Choi, Sang-Hee Kim, Jung-Jae Yee*†
Department of Architecture Engineering, Graduate School, Dong-A University, Busan 604-714, Korea
**Department of Architecture Engineering, Dong-A University, Busan 604-714, Korea*

(Received April 2, 2006; revision received June 28, 2006)

ABSTRACT: The recent indoor air quality problem in a newly-built apartment house is resulted from the improvement of airtightness performance and the use of the building material contained harmful chemical substances. As a result, these cause indoor air quality gradually to become worse and the harmful effect on occupant health called Sick House Syndrome. The most effective solution to improve the indoor air quality is to encourage the use of green building material. However, if the house is built with general building material, ventilation with outdoor air is alternative to dilute the pollutant concentration. The purpose of this research is to find optimum ventilation time in a newly-built apartment house at which the ventilatoris installed. It is found that the HCHO and toluene concentrations are remarkably decreased with the elapse of ventilation time and the concentration reduction rate is increased with increment of air change rate after one hour after operating the ventilator.

Key words: Indoor air quality(실내공기질), Ventilator(환기장치), HCHO(포름알데히드), VOCs (휘발성유기화합물)

기 호 설 명

C : 실내의 오염물질농도 [mg/m^3]
C_i : 초기 오염농도 [mg/m^3]
C_o : 외기 오염농도 [mg/m^3]
M : 실내에서의 오염물질발생량 [mg/h]
Q : 급기량 [m^3/h]
Q_o : 외기도입량 [m^3/h]
t : 시간 [h]
V : 실 용적 [m^3]

† Corresponding author
Tel.: +82-51-200-7609; fax: +82-51-200-7616
E-mail address: jjyee@dau.ac.kr

1. 서 론

최근까지 건설된 국내 신축공동주택에서는 유해 화학물질의 방출 정도가 검증되지 않은 새로운 건축자재의 무분별한 보급으로 인하여 실내공기 오염문제의 심각성이 크게 대두되고 있으며, 이로 인하여 거주자들의 건강한 거주환경 확보가 초미의 관심사가 되고 있다. 밀폐된 실내공간에서 인공적인 설비에 의하여 오염된 공기가 계속 순환된다면, 실내의 각종 오염물질의 농도는 점차로 증가하여 실내공기질(Indoor Air Quality)은

더욱 악화될 수밖에 없으며, 악화된 실내공기는 거주자의 건강에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 현재 신축공동주택에는 포름알데히드(HCHO), 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, 이하 VOCs)을 발생시키는 각종 건자재가 사용되고 있어 환기에 따른 실내공기질 실태조사를 통해 화학물질 제어방안을 검토하여야 할 것이다.

최근 국내에서도 공동주택의 환기설비 기준이 강화되면서 주택 내 환기장치 설치가 불가피해짐에 따라 환기장치 개발 및 적용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

Song et al.[(1)]은 공동주택 내 환기시스템 가동에 따른 실내공기질 제어특성을 검토하기 위해 실제 신축공동주택에 환기시스템을 설치하여 실내공기질 개선효과를 측정하였다. 환기모드(환기회수 0.9회/h)를 적용하였을 경우 HCHO, TVOC 각각 평균 52%, 38%의 제거율을 보여 환기시스템 적용시 오염물질의 개선효과를 보여주었다.

Rhee et al.[(2)]은 현장측정 결과, 환기시스템 가동(환기회수 1회/h) 세대가 미가동 세대에 비해 HCHO의 경우, 약 80 ppb 이상 감소하는 것으로 나타났으며, TVOC의 경우 약 1,400 $\mu g/m^3$ 이상 감소하였으나 두 오염물질 모두 2004년 5월 시행된 국내 환경부 신축공동주택 실내공기질 기준 이하로 감소되지는 않았다.

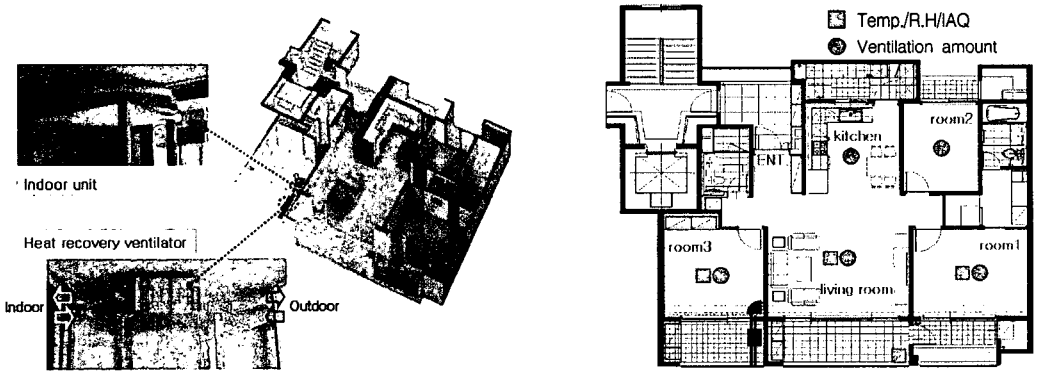
Leigh et al.[(3)]은 전열교환 환기시스템의 성능을 검토하기 위해 Mock-up 실험을 실시하여 농도변화를 측정하고 같은 조건으로 CFD에 적용, 해석한 결과와 측정치와의 비교 · 분석하였다. 그 결과 VOCs는 실험 초반 다소 높은 농도를 보이다가 시간이 경과함에 따라 서서히 감소하는 경향을 보여주었으며 실험종료시에는 농도가 안정화되었다. CFD 해석 또한 실측결과와 비교적 유사하게 나타났으며 시간경과 후 세 가지 VOCs 물질(톨루엔, 에틸벤젠, HCHO)의 농도는 일본 후생노동성의 기준 이하로 나타났다.

본 연구에서는 신축 중인 아파트 현장 샘플하우스 내부에 환기시스템을 설치하여 환기량(외기도입량)의 변화에 따른 실내공기질의 농도변화를 측정 · 분석하고, 환기시간 경과에 따른 실내공기질의 개선효과를 검토함으로써 적정 환기시간을 도출하고자 한다. 동시에 완전확산에 의거한 오염물질농도의 예측식에 의해 환기량에 따른 실내오염농도를 산출한 후 실측결과와 비교 · 검토하였다. 이를 통해 신축공동주택의 적정 필요환기량 및 환기에 의한 실내공기질 개선효과, 상시 소풍량 환기시스템 적용의 필요성을 검토하고자 한다.

2. 측정개요

2.1 측정대상

측정대상 샘플하우스는 경북 G시 A사 아파트 신축현장에 위치한 곳으로서, 입주예정일이 9월이며 측정 당시 준공 전이었다. 측정세대는 40평형의 샘플하우스로 2층에 위치하며, 측정대상 내부는 일반자재를 사용하였다. 측정은 2005년 4월 20~27일까지 8일간 이루어졌으며, 샘플하우스 내부(방 3)에 환기시스템을 설치하여, 환기량 변화에 따른 실내공기질 농도변화를 분석하였다. 측



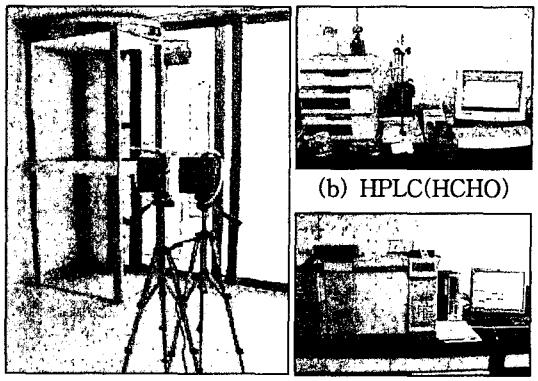
(a) Layout of the ventilator (b) Plan

Fig. 1 Position of the instrumentation and measuring point.

정세대에 설치한 전열교환 환기시스템은 외기도입량을 조절해 주기 위한 목적으로 설치되었으며, 외기도입시 프리+미디움 필터에 의해 먼지 등이 제거되어 실내로 일정 풍량만큼 도입되었다. Fig. 1은 측정대상 샘플하우스의 평면과 측정위치 및 환기시스템 설치모습이다.

2.2 측정항목 및 방법

측정항목으로는 온·습도, 환기량, HCHO, 6개 VOCs 개별물질(벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 디클로로벤젠, 스티렌)로서, 환경부 공정시험방법에 의거하여 창, 문을 모두 개방하고 30분 이상 사전환기시킨 후, 외부공기에 접한 창, 문을 모두 닫고 5시간 이상 밀폐상태를 유지한 후, 실의 중앙지점에서 정해진 유량으로 30분간 시료를 총 2회 채취하였다. 측정일별로 환기횟수 0.5회, 0.75회, 1회, 1.25회, 1.5회로 환기량을 변화시키면서 환기시스템 가동 전 및 가동 후 1시간, 3시간, 5시간 경과시의 실내공기질 농도변화를 검토하였다. HCHO와 VOCs의 측정·분석은 DNPH cartridge와 TENAX-TA tube로 포집하여 HPLC와 GC/MS로 분석하는 정밀측정방법을 사용하였다.



(a) HCHO · VOCs(sampling) (b) HPLC(HCHO) (c) GC/MS(VOCs)

Fig. 2 View of measuring equipments.

Table 1과 Fig. 2에 실내공기질 측정에 사용한 측정장비 및 측정장면을 나타낸다.

3. 측정결과 및 분석

3.1 온·습도 측정결과

Table 2는 환기량 변화에 따른 공기질 샘플링과 병행하여 측정된 측정실 내외부의 온·습도

Table 1 Measuring equipments

Items	Measuring equipments
Temperature & humidity	Sato temperature · humidity system data logger
Quantity of ventilation	CO_2 Gas, multi-point sampler 1309, multi-gas monitor 1312
HCHO	Sibata pump, DNPH cartridge (sampling), HPLC
VOCs	Sibata pump, Tenax-TA tube (sampling), TD-GC/MS

Table 2 Measured temperature & humidity at monitoring point

Temperature/humidity \ Case			Air change rate				
			0.5 ACH	0.75 ACH	1 ACH	1.25 ACH	1.5 ACH
Average outdoor temperature during measure time (℃)			16.7	19.1	19.2	20.3	20.0
Temperature (℃)	System off		18.1	17.2	17.2	17.1	18.0
	System on	After 1 hour	17.4	16.4	17.4	16.9	18.0
		After 3 hour	17.2	16.8	17.3	17.7	18.0
		After 5 hour	16.7	16.4	16.7	17.6	17.8
Average outdoor humidity during measure time (%)			28.5	27.6	36.4	38.4	42.2
Humidity (%)	System off		45.2	44.2	49.3	54.3	59.8
	System on	After 1 hour	41.9	39.5	50.7	52.5	54.8
		After 3 hour	41.9	40.2	47.9	50.1	49.4
		After 5 hour	37.8	41.3	47.4	47.9	45.0

변화를 나타내고 있다. 측정대상실은 측정 5시간 전부터 밀폐되었고, 직달 일사의 유입이 적은 곳에 위치하여 실내의 온도는 큰 차이를 보이지 않았고, 외기 평균 온도는 측정시간 5시간 동안의 온도로 조금씩의 차이를 보이나 1차 측정일을 제외하고는 비교적 유사한 온도를 보여주었다.

한편, 실내습도는 측정일별로 다소의 차이를 보이고 있다. 실내에 비해 실외의 습도가 다소 낮은 경향을 보이고 있는데, 이는 측정시 밀폐된 조건에 의하여 장시간 외부의 공기와 교류가 없었고, 또한 측정실에 재실자가 있었으므로 시간에 따라 습도가 조금씩 상승한 것으로 사료된다.

3.2 자연환기량 측정결과(단위세대 자연환기량)

Fig. 3과 Table 3에 측정대상인 샘플하우스의 자연환기량 측정결과를 나타낸다. 자연환기량 측정은 KS규격의 옥내 환기량 측정방법(이산화탄소법)[6]의 농도감쇠법에 의거하여 측정하였다. 표에 주목하면 자연환기량은 각 실의 문을 모두 개방한 뒤 측정한 각 실의 중앙지점의 결과로서 거의 차이가 없었으며, 자연환기량을 환기횟수로 환산하면 0.21~0.25회/hr의 결과를 나타내었다.

이 결과는 실내외 온도차가 크지 않아 환기량이 작게 나타난 점도 있으나, 이번 측정실의 기밀성능이 비교적 우수하다는 것을 나타낸다. 한편, 측정시 대상아파트는 공사가 진행중이었으며, 창호공사가 완전하게 이루어지지 않았기 때문에 완공 후 사용시에는 기밀성능이 더욱 증가될 것으로 사료된다. 그러므로 공동주택의 실내공기질 개선을 위해서는 상시 일정한 환기량을 확보할 수 있는 기계 환기장치의 적극적 채용이 불가피함을 알 수 있다.

3.3 HCHO 농도 측정결과

Fig. 4는 HCHO의 측정결과를 환기시간에 따른 농도 감소율로 나타내고 있다. 측정결과, 환기시스템 가동 후 시간이 경과할수록 농도는 현저하게 감소하였으며, 환기횟수가 증가함에 따라 농도 감소율 역시 증가되는 경향을 볼 수 있었다.

환경부 신축공동주택 HCHO 권고기준인 210 $\mu g/m^3$를 측정시간 내에 만족하지 못하였으나 환기횟수 1.5회의 경우 환기시스템 가동 전 초기농도에 비해 5시간 가동 후 농도는 약 58% 이상의 감소율을 보여주었다.

HCHO 성분은 단열재, 합판, 섬유, 가구 등의 접착제에 주로 사용되고 있으며, 방출량은 시간에 비례하여 감소하고, 특히 온도가 높을 때 실내농도가 증가하게 된다. 따라서 실내온도가 다소 높았던 환기횟수 1회, 1.25회, 1.5회 때의 HCHO 초기농도는 다른 측정일에 비해 다소 높게 나타

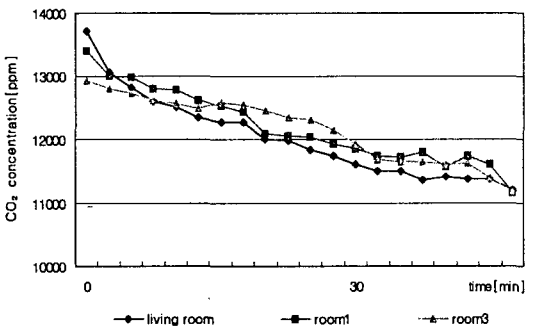


Fig. 3 Natural ventilation amount at monitoring point.

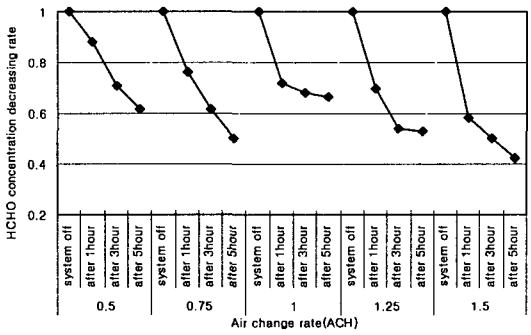


Fig. 4 HCHO concentration decreasing rate by ventilation amount.

Table 3 Natural ventilation amount and air change rate

	Living room	Room 1	Room 3
Natural ventilation amount (CMH)	6.7	7.8	6.1
Air change rate (ACH)	0.25	0.23	0.21

나는 경향을 볼 수 있었다.

환기시간 경과에 따른 HCHO 농도의 감소효과는 환기시작 후 1시간 내에 가장 뚜렷한 개선효과가 나타나고 있으며, 환기시간에 따른 HCHO의 농도 감소율이 42~58%로 환기량 증대에 따른 실내공기질 개선효과의 경향이 인정되며 환기횟수 1.5회일 때의 환기효과가 가장 높게 나타났다. 또한 환기시작 전의 초기농도에 비해 환기 5시간 경과 후에는 그 양이 반 이상 줄어들지만, 환기시작 전의 초기농도는 측정기간 동안 충분한 환기를 실시하였으나 감소효과는 나타나지 않았다. HCHO의 반감기가 2~4.4년 정도인 것을 감안한다면 환기제어뿐만 아니라 HCHO의 방출이 적은 건자재의 사용은 매우 중요하다.

3.4 톨루엔 농도 측정결과

Fig. 5는 톨루엔의 측정결과를 환기시간에 따른 농도 감소율로 나타내고 있다. 측정결과, 환기횟수 1회 이상에서는 환기시스템 가동 후 시간이 경과할수록 농도는 현저하게 감소하였으며, 환기횟수가 증가함에 따라 농도 감소율 역시 증가되는 경향을 볼 수 있었다.

환경부 신축공동주택 톨루엔 권고기준인 1,000 $\mu g/m^3$를 측정시간 내에 만족하지 못하였으나 환기횟수 1.5회의 경우 환기시스템 가동 전 초기농도에 비해 5시간 가동 후 농도는 약 60% 정도의 감소율을 보여주었다.

VOCs의 개별물질인 톨루엔은 건축자재 중 바닥 접착제, 칩보드, 페인트, 가구 광택제 등에서 주로 발생하며, 시공 후 초기에 다량 방출하게

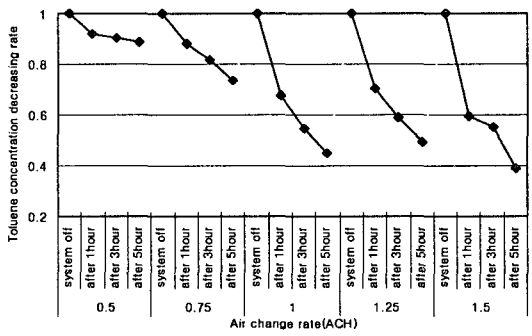


Fig. 5 Toluene concentration decreasing rate by ventilation amount (measurement).

되며 시간의 경과에 따라 점차로 감소한다. 또한 실내의 온도가 높을 때 농도가 증가하게 된다. 따라서 전술한 HCHO와 동일하게 실내온도가 다소 높았던 환기횟수 1회, 1.25회, 1.5회 때의 톨루엔 초기농도값은 다른 측정일에 비해 다소 높게 나온 경향을 나타내었다.

환기시간 경과에 따른 톨루엔 농도의 감소효과는 환기시작 후 1시간 내에 뚜렷한 개선효과가 나타나고 있으며, 환기시간에 따른 톨루엔 농도의 감소율이 15~60%로 환기량 증대에 따른 실내공기질 개선효과의 뚜렷한 경향이 인정된다. 특히 환기횟수 1회시부터는 개선효과가 뚜렷하며, 1.5회일 때의 환기효율이 가장 좋게 나타났으나, 금번 실험의 경우 환기횟수 1회, 1.25회, 1.5회의 결과는 대체로 유사한 결과를 나타내었다.

3.5 완전확산에 의거한 톨루엔 농도 예측 및 비교

본 절에서는 환기량 변화에 따른 톨루엔 측정결과와 완전확산에 의거한 농도 예측결과를 비교하였다. 완전확산을 가정하고 방출농도의 흡착을 무시한 경우 오염물질농도 예측식은 다음과 같다.

$$C = C_i e^{-\frac{Q}{V}t} + \left(C_o + \frac{M}{Q}\right)\left(1 - e^{-\frac{Q}{V}t}\right) \quad (1)$$

$$C = C_o + \frac{M}{Q_o} \quad (2)$$

식(1)은 실내오염물질농도는 외기오염농도, 실내오염물질 발생량과 환기량의 함수임을 알 수 있으며, 시간에 따른 실내의 오염물질농도 예측이 가능하다. 식(2)는 식(1)에서 $t \rightarrow \infty$, 즉 정상상태로 가정할 경우의 농도이며, 외기오염농도 및 실내오염물질 발생량에 의해 실내농도가 결정됨을 알 수 있다. 측정실(방 3)의 상황과 같은 조건(환기량, 오염물질 발생량)을 상기 식에 대입하여 환기량 변화에 따른 실내의 톨루엔 농도값을 예측하여 보았다. Fig. 6은 환기량 변화에 따른 톨루엔 농도의 예측결과를 나타낸 것으로, 정상상태에 도달하는 시간은 환기량과 밀접하게 관련하고 있음을 알 수 있다. Fig. 7은 측정결과와의 비교를 위한 것으로, Fig. 5와 비교해 보면 실측치와는 다소 차이를 보이고 있다. 그러나 실측치는 공정시험방법에 의거한 실중앙에서의 채취결과로

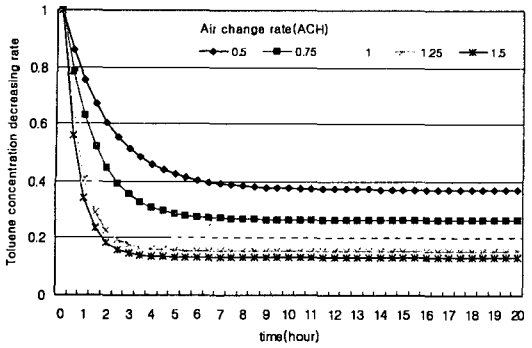


Fig. 6 Toluene concentration decreasing rate by calculation.

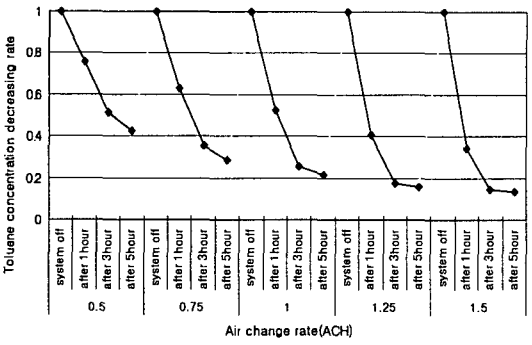


Fig. 7 Toluene concentration decreasing rate by ventilation amount (calculation).

환기시스템의 토출각도에 따른 기류형성으로 인해 오염물질의 농도분포에 영향을 미쳤을 것이라 사료된다. 측정치와는 달리 예측치는 완전확산을 가정한 것이나, 1시간 이후의 오염물질의 농도가 급격하게 감소되고 환기량이 증가할수록 1시간 이후에 도달하는 농도 감소율이 증가하는 경향성은 서로 비슷한 것으로 인정된다. 한편 Fig. 6은 오염물질 농도값이 안정상태에 도달하는 시간을 나타내는 것으로 환기횟수 0.5회시 20시간 이후, 0.75회시 18시간 후, 1회시 14시간 후, 1.25회시 11시간 후, 1.5회시 10시간 후로 나타나 상시 소풍량 환기의 개념이 신축공동주택에서 지속적으로 방출할 수 있는 화학물질을 유효하게 제거하는 환기방안이라는 것을 시사하고 있다.

실측치와 완전확산에 의한 예측치를 종합적으로 비교하면 기류 영향에 의해 다소 상이한 부분이 있으나 대체로 비슷한 경향성을 나타낸다고 할 수 있다. 한편 향후 실내 환기량 변화에 따른 정확한 측정치를 얻기 위해서는 기류 성상을 미리 CFD(Computational Fluid Dynamics) 시뮬레이션으로 예측한 후 최대한 기류의 영향을 받지 않는 곳에서 측정을 하거나, 다(多)점에 의한 측정을 하는 등의 측정점 선정에 주의를 기해야 할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서 도출된 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 측정대상 아파트의 자연환기량은 실별로 약간의 차이를 보였으나, 환기횟수 0.21~0.25회/hr 정도로 나타나, 국내 환기 기준치보다 크게 부족한 것으로 나타났다.

(2) HCHO 측정치는 환기시스템 가동 후 시간이 경과할수록 농도는 현저하게 감소하였으며, 환기횟수가 증가함에 따라 농도 감소율 역시 증가하여 환기횟수 1.5회의 경우 약 58% 이상의 농도 감소율을 보여주었다.

(3) 톨루엔 측정치도 환기시스템 가동 후 시간이 경과할수록 농도는 현저하게 감소하였으며, 환기횟수가 증가함에 따라 농도 감소율도 증가하였으며 환기횟수 1.5회의 경우 60% 정도의 농도 감소율을 보여주었다.

(4) 농도 측정치를 완전확산에 의거한 예측치와 비교하면, 기류 영향에 의해 다소 상이한 부분이 있으나 환기량에 따른 실내오염물질 농도감소 패턴은 대체로 유사한 경향성을 보였다.

본 연구는 일반자재를 사용한 신축공동주택에서의 측정결과로 환기시스템 가동 후 안정화된 농도가 환경부 신축공동주택 실내공기질 권고기준을 만족하지 못하고 있다. 따라서 향후, 친환경자재를 시용한 실을 대상으로 동일한 실험을 실시하여, 신축공동주택의 자재 사용 특성에 따른 적정 필요환기량 및 환기시간을 도출하여야 할 것이다.

후 기

본 논문은 환경부 차세대 핵심환경기술개발사업의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Song, D. S., Ko, H. J., Cho, W. H., Lee, M. K., Yun, I.-C. and Ju, U.-S., 2005, The effect of ventilation system on IAQ in an apartment house, Proceeding of the SAREK, pp. 848-854.
2. Rhee, E. K., Yu, H. K. and Park, J. C., 2005, A study on a proper reduction process of indoor air pollutants in newly-constructed multi-family houses, Korean Journal of Air Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 17, No. 5, pp. 468-476.
3. Leigh, S. B., Kim, C. N., Kim, D. S., Kim, T. Y. and Lee, Y. G., 2005, An estimation of VOCs concentration in the apartment housing with sensible & latent heat recovery ventilator, Proceedings of the SAREK, pp. 70-75.
4. Yee, J. J., Lee, J. H. and Lee, S. M., 2005, IAQ field survey in apartment housing equiped for heat recovery ventilation system with air cleaning function, Korean Journal of Air Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 17, No. 7, pp. 688-693.
5. ASHRAE Standard, 2001, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, ASHRAE.
6. KS F 2603, Korean Standards Association.