

건물 시공단계의 실내공기질 시뮬레이션 평가 연구

최 정 민, 조 성 우, 박 창 섭*, 박 민 용**, 이 경 희***†

창원대학교 건축학부, *창신대학 건축디자인과, **부산정보대학 건축과, ***부산대학교 산업건축학과

A Study on the Simulation Evaluation of IAQ at the Process of Building Construction

Jeong-Min Choi, Sung-Woo Cho, Chang-Seob Park*, Min-Yong Park**, Kyung-Hee Lee***†

School of Architecture, Changwon National University, Changwon 641-773, Korea

*Department of Architectural Design, Changshin College, Masan 630-522, Korea

**Department of Architecture, Busan Info-Tech College, Busan 616-737, Korea

***Department of Architectural Engineering, Pusan National University, Miryang 627-702, Korea

(Received August 24, 2006; revision received December 2, 2006)

ABSTRACT: The purpose of this study is to evaluate indoor air quality at the stage of building construction. To check the IAQ at the stage of construction IAQX simulation program developed by EPA was used and the values of TVOC were analyzed with time-series. The Simulation conditions are as follows. 1) Ventilation rate, 2) Time schedule of works, 3) Material change. Through this simulation, the major factors which affect the IAQ were analyzed and the importance of empirical data about the time-series emission rate of concerned material could be confirmed.

Key words: Building(건물), Construction(시공), IAQ(실내공기질), Simulation(모의실험), Time-series analysis(시계열분석), IAQX(EPA 실내공기질 평가 프로그램), TVOC(총휘발성유기화합물), HCHO(포름알데히드)

기 호 설 명

- C : 유해물질 농도 [mg/m^3]
- EF : 유해물질 방출률 [mg/hm^2]
- N : 환기횟수 [times/h]
- R^2 : 결정계수
- S : 재료의 표면적 [m^2]
- t : 시간 [h]
- V : 실부피 [m^3]
- y : 시간별 유해물질 방출률 [mg/hm^2]

1. 서 론

건물공사에는 소재산업의 기술발달과 더불어 다양한 건축 내장재료의 사용이 급격히 증가하고 있다. 이러한 내장재료에는 다량의 휘발성 유기화합물질(VOCs) 및 포름알데히드(HCHO) 등 유해물질들을 함유하고 있고 이러한 유해물질이 실내 공기 중으로 방출되어 거주자의 건강에 위협적인 요소가 되고 있다. 더욱이 시공법의 발달로 공기가 점차 짧아지면서 입주 전 유해물질의 제거가 주된 관심이 되고 있지만 주로 건물 완공 이후 현장측정 및 분석에 의한 실내공기질 관련 기준의 충족 여부를 확인하고 있어 공기질 관련 문제가 발생할 경우 사후적인 대책을 강구하는 수준

† Corresponding author

Tel.: +82-55-350-5346; fax: +82-55-350-5349

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

에 머무르고 있다.

건축 내장재료는 주로 건물 시공단계에서 시간 흐름에 따라 다양한 종류의 유해물질을 배출하는 특성을 나타내게 된다. 외국의 경우 그 나라에서 생산, 시판되는 재료를 토대로 소형 챔버를 이용한 실험을 통하여 시간의 흐름에 따른, 즉 경시 변화에 따른 유해물질 배출특성을 파악하고 건물 시공단계에서 건축 내장재료 선정이나 내장재료의 공사시기, 입주 전 환기계획 등 여러 제요인이 건물 실내의 유해물질농도에 미치는 영향을 시뮬레이션을 통해 사전에 검토함으로써 그 대책이나 개선책을 강구하고 있는 실정임을 감안해 볼 때, 우리나라에서도 시뮬레이션에 의한 시공단계에서의 실내공기질 성능평가 연구가 필요한 시점이라 할 수 있겠다.

이에 본 연구에서는 기 개발된 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 주거용 건물의 시공단계에서 각 공종별 작업개시 시기 및 내장재료 선정, 환

기계획 등 제요소가 건물 실내공기질에 미치는 영향을 검토하여 봄으로써 시뮬레이션 프로그램의 적용 가능성 모색과 함께, 시뮬레이션에 입력하는 건축재료 데이터베이스 구축시 고려사항에 대해서 살펴보고자 한다.

본 연구에서는 시공단계의 시뮬레이션 평가를 위해 기존의 여러 실내공기질 평가 프로그램들 중 미국 EPA의 IAQX 프로그램을 이용하여 검토하였으며, 검토된 건축 내장재료는 국내에서 생산된 재료 중 S대에서 측정된 벽지와 온돌마루의 소형 챔버 실험값을 시뮬레이션 평가에 이용하였다.

2. 실내공기질 평가 프로그램 고찰

2.1 미국 EPA의 IAQX 프로그램

미국 EPA(Environmental Protection Agency)의 통합 IAQ 모델링 도구인 IAQX(Simulation

Table 1 Source model categories of GPS sub program

Categories	Source model
Constant & instant	<ul style="list-style-type: none"> • None-area constant source (emission rate) • None-area constant source (flow/concentration) • Area constant source • Ambient air as a constant source • Instant source
First-order & higher-order decay	<ul style="list-style-type: none"> • First-order decay (E0/k) • First-order decay (M0/k) • Double-exponential (+/+) • Double-exponential (+/-) • Second-order decay • nth-order decay
Solvent evaporation (wet sources)	<ul style="list-style-type: none"> • VOC emission from pure solvent • VB model (TVOC from oil-based coatings) • VBX model (VOC from oil-based coatings)
Source diffusion (dry sources)	<ul style="list-style-type: none"> • HCHO from particleboard • Diffusion model 1 PVC flooring • Diffusion model 2 PVC flooring • JDND model
Emissions from water	<ul style="list-style-type: none"> • Emission from water pool (kL) • Emission from water pool (kg)
Time-varying	<ul style="list-style-type: none"> • Time-varying indoor source • Ambient air as time-varying source
Combined & miscellaneous	<ul style="list-style-type: none"> • Latex paints and plasters during and after application • "Power law" model for long-term emissions • Ambient air as a sinusoidal function

Table 2 Source model categories of IA-QUEST by master format

Categories	Sub categories (Number of materials)
6. Wood and Plastics	<ul style="list-style-type: none"> • 6160 Sheathing (15) • 6400 Architectural Woodwork (6) • 6415 Countertops (2) • 6510 Form Board Adhesive (1)
7. Thermal and moisture protection	<ul style="list-style-type: none"> • 7920 Joint Sealants (3)
9. Finishes	<ul style="list-style-type: none"> • 9200 Plaster and Gypsum Board (4) • 9510 Acoustical Tile Ceiling (3) • 9600 Flooring (exclude 9640, 9650 and 9680) (3) • 9640 Wood Flooring (1) • 9650 Resilient Flooring (5) • 9680 Carpet (10) • 9681 Carpet Adhesive (2) • 9910 Paints (3) • 9930 Stains and Transparent Finishes (11)

Tool Kit for Indoor Air Quality & Inhalation Exposure)는 GPS, PM, Slab, Spill, VBX의 개별 시뮬레이션 부프로그램으로 구성된다. 이 가운데 GPS 부프로그램은 건축 내장재료의 다양한 오염 물질특성과 환기계획 등 시간의 흐름에 따른 해석이 가능하고, 유해물질에 대한 규제치를 만족시키는 적정 환기횟수의 산정도 가능하여 건축 분야에서 널리 활용될 수 있는 부프로그램이다. GPS 부프로그램에서는 Table 1과 같이 유해물질의 방출특성을 25가지 모델로 분류하여 해당 건축 마감재료에 적합한 모델을 선정하고 이 모델에 필요한 계수값들을 사용자가 직접 입력하도록 하고 있으며, 이와 함께 해당 마감재료의 설치 및 제거시간을 지정할 수 있게 함으로써 시공단

계에서의 시간경과에 따른 유해물질 농도분석이 이루어지게 된다.

2.2 캐나다 NRCC의 IA-QUEST 프로그램

캐나다 NRCC 국립연구소(National Research Council of Canada)에서는 챔버 테스트를 통한 건축자재 배출특성 데이터베이스의 구축과 함께 시뮬레이션 프로그램인 IA-QUEST(Indoor Air Quality Emission Simulation Tool)를 개발하여 이용하고 있다. 이 프로그램도 미국 EPA의 IAQX와 유사한 기능을 수행하여 유해물질 배출특성 DB를 기반으로 건축자재의 선택, 건물 환기를 및 환기스케줄의 입력 등을 통해 단일실 모델에서의 유해물질농도 예측이 시계열로 이루어지게 된다. 특히 본 IA-QUEST에서는 Fig. 1과 같이 실제 챔

Emission Data for Test: P17

Contaminant	Nominal Emission Factor (mg/m ² h)	Maximum Emission Factor (mg/m ² h)
1,2-Dichlorobenzene	0.00687751	0.03134
2,2,4-Trimethyl-1,3-pentanediol diisobutyl ether	0.28622	0.120
2,2,4-Trimethyl-1,3-pentanediol isobutyl ether	14.899	31.038
2-Ethyl-1-hexanol	0.03831	0.23147
Acetic acid	0.23428	0.93797
Acetone	0.11599	1.692
Acetophenone	0.31736	1.044
Benzaldehyde	0.18006	0.66563

Test date: 1998-03-23 Test laboratory: Indoor Environment Research Program, IRC/NRC
 Product: Paint (Interior, Latex) (P17)
 Product notes: Acrylic Latex, Ultra pure white eggshell Test Code: CMEIAQ P17

Test conditions:
 Temperature = 23 °C Humidity = 50 % Velocity = .05 m/s
 Turbulence intensity = 1 % Air change rate = 1 ACH Loading ratio = 0.40000 m²/m³
 Test notes: Source: Local Retail Outlet

Product sample:
 Shape/Dimension: 0.2 x 0.1
 Surface area = .02 m² Thickness = mm Initial mass = g

Fig. 1 Test record details of the material.

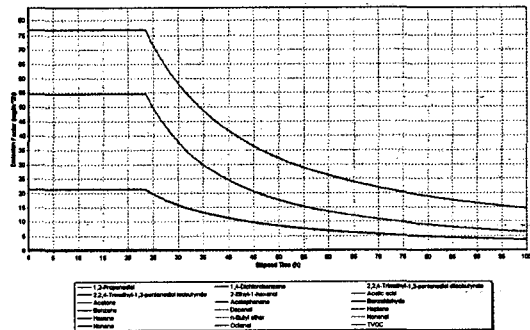


Fig. 2 Emission factors from latex paint.

시뮬레이션 검토는 Table 4와 같이 3가지의 환기횟수 조건 안과 온돌마루 공중의 개시시간을 벽지/천장지 시공후 48시간(2일)째 하는 안(Case 1)과 96시간(4일)째 하는 안(Case 4), 그리고 벽지/천장지 대신에 페인트를 사용하는 안(Case 5)에 대해 각각 비교하는 것으로 하였다.

검토재료의 TVOC 방출률 시계열 회귀식은 환경부고시 제2004-80호(2004.6.5)의 실내공기질 공정시험방법에 따라 S대 건축환경계획센터의 소형 챔버실험(25℃, 50% 조건하)에서 구한 각 시간별 값을 이용하여 도출한 것으로 Fig. 4, Fig. 5와 같으며, 이 시계열 계수값들을 GPS 부프로그램의 First-order decay(E0/k) 오염물질 모델 입력계수로 사용하였다. TVOC 기준치값은 일본 후생노동성의 주거용 건물 잠정 기준값 0.4 mg/m³(400 µg/m³)으로 하여 검토하였다.

3.2 프로그램 자료 입력 및 시뮬레이션

EPA의 GPS 부프로그램에 소형 챔버실험에 의한 온돌마루와 페인트의 시각별 자료를 입력하는 과정을 기술하면, 먼저 온돌마루의 자료입력은 Fig. 5에서 도출된 E0값 0.2486과 k값 0.0034를 Fig. 6에서와 같이 GPS의 소스모델 화면에 입력하게 되며 여기에 S인 바닥의 오염물질 방출면적인 14.04 m²와 공중이 개시되는 시각인 Start Time을 설정하여 입력한다.

페인트 자료입력은 IA-QUEST의 페인트 DB 자료를 이용, 시간에 따른 단위면적당 TVOC 방출률을 다음 식(1), (2)에 따라 계산하였고, 여기에 해당면적을 곱하여 총방출량을 산정한 후 이

값을 Fig.7과 같이 Input emission data for time-varying indoor source로써 GPS 부프로그램에 입력하였다.

$$t \leq 23.5 \text{ h}, 2915.5242 \times 23.5^{(-1.1518)} \quad (1)$$

$$t > 23.5 \text{ h}, 2915.5242 \times t^{(-1.1518)} \quad (2)$$

Fig. 8은 각 시공 공정별로 실내오염물질의 시

Emission Data for Time-Varying Indoor Source (Type 61)

Time	Interior Late
0	3729.2410
5	3729.2410
10	3729.2410
15	3729.2410
20	3729.2410
25	3472.7148
30	2814.9339
35	2356.9960
40	2020.9879
45	1784.5998
50	1582.0416
55	1400.4498
60	1268.9984

Fig. 7 Input emission data for time-varying indoor source (paint).

Simulation Results (Concentration in mg/m³)

Time (h)	ONDOL FLOOR	INTERIOR LATE
0	0.000E+0	0.000E+0
5	0.000E+0	1.800E+2
10	0.000E+0	1.040E+2
15	0.000E+0	1.850E+2
20	0.000E+0	1.850E+2
25	0.000E+0	1.580E+2
30	0.000E+0	1.327E+2
35	0.000E+0	1.101E+2
40	0.000E+0	9.370E+1
45	0.000E+0	8.134E+1
50	1.189E-1	7.171E+1
55	1.504E-1	6.402E+1
60	1.489E-1	5.775E+1

Fig. 8 Simulation results of concentration.

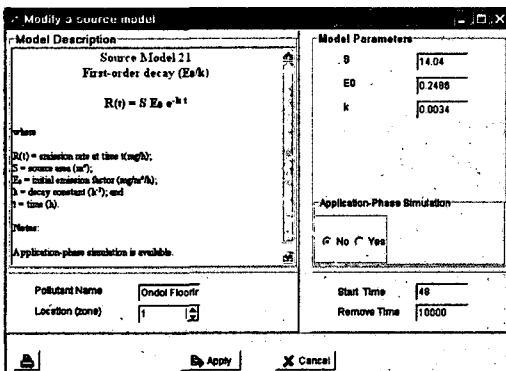


Fig. 6 Input of Ondol flooring data.

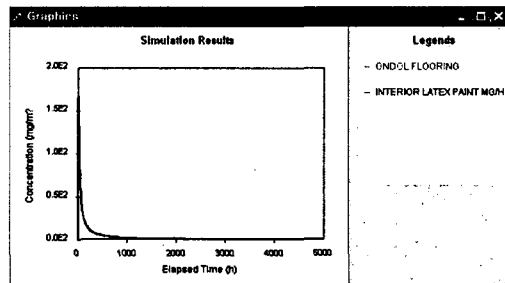


Fig. 9 Simulation graph.

간별 농도를 나타낸 것이며, 이를 그래프로 나타낸 것이 Fig. 9이다.

3.3 결과분석

3.3.1 환기횟수에 따른 실 오염물질 농도분석

주침실에 대해 환기횟수를 0.7회/h로 일정하게 유지시켜 준 경우를 분석해 보면, Fig. 10과 같이 TVOC 농도는 6시간까지 증가하다가 감소하기 시작하고, 온돌마루 바닥재가 설치되는 48시간부터 다시 증가하기 시작하여 53시간째에 0.48 mg/m^3 에 도달 후 감소하여 78시간 이후부터 0.40 mg/m^3 이하를 나타내고 있다. 한편, 환기횟수를 1.4회/h로 늘인 경우에는 Fig. 11과 같이 환기량 증가로 인해 공사기간 동안 내내 0.40 mg/m^3 이하의 농도값이 나타나고 있으며, 최고 농도값은 4시간째에서 0.27 mg/m^3 을 나타내고 있다.

공사단계에서 주간과 야간의 환기량 차이를 고려하여 하루 중 환기횟수를 12시간씩 0.7회/h와

1.4회/h로 주기적으로 변화시켜 검토한 경우에는 Fig. 12와 같이 실내 농도값이 12시간마다 증감을 반복하면서 변화하다가 61시간 이후부터는 0.40 mg/m^3 이하로 떨어져 상시 환기횟수를 0.7회/h로 가동한 경우보다 시간상 17시간을 단축시킬 수 있는 것으로 나타났다.

3.3.2 공정에 따른 분석

Table 4의 두 가지 공사공정에 따른 비교 분석을 위해 환기횟수를 상시 0.7회/h를 유지하면서 벽지 및 천장지 설치 후 48시간이 지난 이후에 바닥에 온돌마루를 시공한 Case 1 경우와 벽지 및 천장지 설치 후 96시간이 지난 이후에 시공하는 Case 4의 경우를 비교해 보면 Fig. 13과 같이 Case 1은 78시간인데 비해 Case 4는 35시간이 지난 이후부터 0.40 mg/m^3 이하를 나타내게 되어, 오히려 온돌마루 시공을 하루 늦춰서 실시하는 방안이 작업중의 대상공간 실내 공기질 개선에 도움이 될 수 있다는 것을 나타내고 있다.

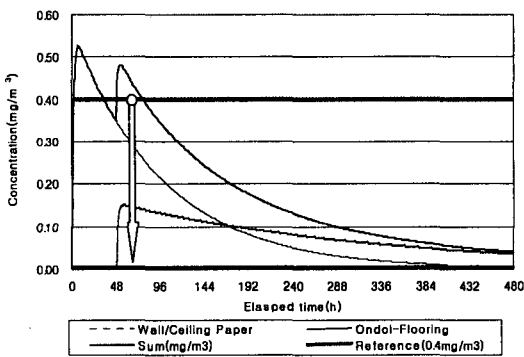


Fig. 10 Simulation result of Case 1.

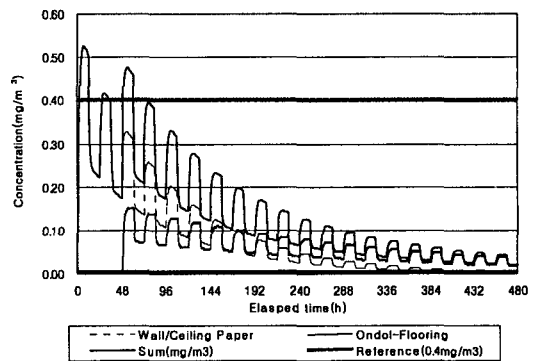


Fig. 12 Simulation result of Case 3.

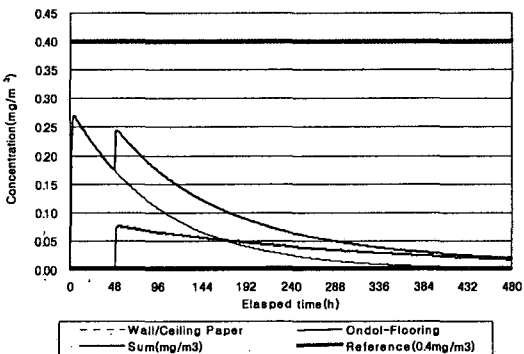


Fig. 11 Simulation result of Case 2.

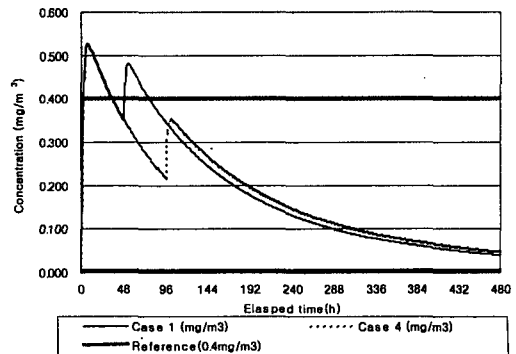


Fig. 13 Simulation result of Case 4.

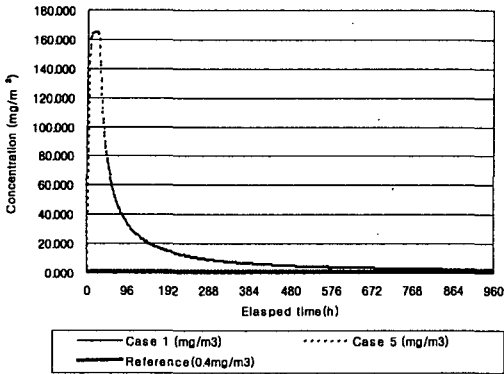


Fig. 14 Simulation result of Case 5.

3.3.3 건축 마감재료 차이에 따른 분석

건축 마감재료 차이에 따른 검토를 위해 벽지/천장지 대신 앞서 IA-QUEST의 페인트를 사용한 Case 5의 경우와 비교해 보면 Fig. 14와 같이 Case 1은 78시간 이후부터 0.40 mg/m^3 이하의 값을 나타내고 있는 반면에, 페인트를 사용한 경우에는 약 4,380시간 이후부터 0.40 mg/m^3 이하를 나타내고 있어 마감재료에 따라 소요시간의 차이가 크게 나타날 수 있음을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구의 주요 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 실내 공기질 공정시험방법에 의한 소형 챔버 실험자료를 이용하여 국내에서 생산되는 주거용 건물의 침실을 대상으로 벽지/천장지 및 온돌마루에 대한 TVOC 시간별 방출률 자료를 이용, 각 재료별 TVOC 방출률 경험식을 산정하였으며, 이를 미국 EPA의 GPS 부프로그램 내 소스 모델인 First-order decay($E0/k$) 모델 입력계수로 사용하고 시공단계에서의 각 공종별 시계열특성을 모형화함으로써 시공단계에서의 환기계획, 공종별 공정계획, 마감재료 선정 등 제요소가 시공단계에서 건물 오염물질의 실내 공기질 농도를 분석하는 과정을 제시하였다.

(2) 대상모델인 32평형 공동주택 주침실에 대하여 일본 후생노동성 주거용 건물의 TVOC 잠정 기준값인 0.4 mg/m^3 ($400 \mu\text{g/m}^3$)과 비교한 결과, TVOC 농도가 0.4 mg/m^3 이하에 도달하는 시간이 환기량 0.7 회/h 인 경우에는 78시간인데 비

해, 1.4 회/h 인 경우에는 공사기간 동안 내내 0.40 mg/m^3 이하의 농도값이 나타나고 있었으며, 공사단계에서 주간과 야간의 환기량 차이를 고려하여 하루 중 환기횟수를 12시간씩 0.7 회/h , 1.4 회/h 로 변화시킨 경우에는 61시간 이후부터 0.40 mg/m^3 이하로 떨어져 상시 환기횟수를 0.7 회/h 로 가동한 경우보다 시간상 17시간을 단축시킬 수 있는 것으로 나타났다. 또한 공중 분석에서는 Case 1, Case 4의 비교에서 나타난 바와 같이 각 개별공종의 공사 개시시점을 조정함으로써 공사단계에서의 작업자를 위한 실내 공기질 개선이 이루어질 수 있음을 확인하였으며, 사용재료 분석에서는 Case 1, Case 5의 비교에서 나타난 바와 같이 건축 마감재료의 시계열 오염물질 방출률에 따라 해당 오염물질이 장시간 실내 농도에 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다.

(3) 현재 국내 KS 마크, 환경마크, HB 마크 등 인증등급에서 이루어지는 건축자재에 대한 오염물질 방출시험 농도값들은 경시변화를 고려하지 않는 단일수치의 방출량값으로 제시되고 있으므로, IAQX 등 시뮬레이션 프로그램에 적용하기 위해서는 시간의 흐름을 고려할 수 있는 형태의 건축 마감재료의 데이터베이스 구축이 선행되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 환경부 2004년도 차세대 핵심환경기술개발사업인 '주거건물의 실내공기질 향상을 위한 성능평가 및 지침 프로그램 개발' 연구에 의해 지원되었습니다.

참고문헌

1. Kim, S. D., 2005, The method of certificate in eco-friendly materials, AIK, pp. 1-16.
2. Kim, S. H., No, S. T. and Kim, K. S., 2005, A study on natural airflow efficiency and indoor airflow characteristics with different types of openings in high-rise residential buildings, 2005 SAREK Summer Annual Conference, pp. 63-69.
3. Kim, C. N., Kim, D. S., Kim, T. Y., Lee, Y. G. and Leigh, S. B., 2005, An estimation of

- VOCs concentration in the apartment housing with sensible & latent heat recovery ventilator, 2005 SAREK Summer Annual Conference, pp. 70-75.
4. Hong, G. P., Kim, D. W., Joo, H. S., Kim, K. H., Kim, T. Y and Kim, B. S., 2005, Prediction of hospital indoor air quality based on building material grades using CFD method, 2005 SAREK Summer Annual Conference, pp. 91-96.
 5. Kang, D. H., Kim, J. H., Choi, D. H., Kim, S. S., Yeo, M. S. and Kim, K. W., 2005, A numerical analysis of VOCs emission affected by temperature variation in floor heating space, 2005 SAREK Summer Annual Conference, pp. 109-114.
 6. Kang, H. J., Yu, H. K., Park, J. C. and Rhee, E. K., 2005, An experimental study on the effect of IAQ improvement strategies for new apartment houses, 2005 SAREK Summer Annual Conference, pp. 795-800.
 7. Chun, C. Y., Kim, S. W., Sim, J. B. and Jo, W. J., 2005, A improvement of indoor air quality for apartment housing, 2005 SAREK Summer Annual Conference, pp. 1001-1005.
 8. Yu, H. K., Park, J. C. and Rhee, E. K., 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.
 9. Pang, S. K., Son, J. Y. and Ahn, B. W., 2005, Prediction of the concentration decay of volatile organic compounds under different air change rates and loading factor conditions, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 17, No. 6, pp. 505-513.
 10. Lee, J. J., Lee, J. H. and Lee, S. M., 2005, IAQ field survey in an apartment housing equipped for heat recovery ventilation system with air cleaning function, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 17, No. 7, pp. 688-693.
 11. Ministry of Land, Infrastructure and Transport in Japan, 2003, A manual for the prevention of the sick building according to the revised standard law of architecture, engineering.