

공동주택의 실내공기환경 개선에 관한 연구

A Study on the Improvement of Indoor Air Quality in Apartment Buildings

이 상 형*, 박 진 철**, 이 언 구***
S. H. Lee, J. C. Park, E. K. Rhee

Key words : IAQ(Indoor Air Quality, 실내공기환경), Air pollutants(공기오염물질; VOCs(Volatile Organic Compounds, 휘발성 유기용제), Formaldehyde(포름알데히드), Radon(라돈), Building materials(건물재료), Emission rate(방사량), Ventilation rate(환기량)

Abstract

This study aims to present the fundamental strategies to improve the Indoor Air Quality (IAQ) in apartment buildings. To investigate the concentration of indoor air pollutants such as radon, formaldehyde, and VOCs, both the document survey and the field measurement were conducted. In addition, to identify the source of the air pollutants, the laboratory experiment was carried out for various building materials. Finally, the minimum period to be reserved before building occupation to ensure healthy IAQ, which largely depends on the ventilation rates, was simulated using a simple computer program. The results of this study can be summarized as follows:

1. In case of newly-constructed apartment houses, concentrations of formaldehyde, VOCs and radon were found to exceed the standard. Meanwhile, at existing apartment houses, concentrations of VOCs, particularly toluene and xylene, highly exceeded the standard level. Concentrations of formaldehyde and radon, however, had been lowered according to the duration of occupation.
2. The laboratory experiment of concentration of pollutants per square meter of building material surface area showed that radon gas was much emitted from the gypsumboard; formaldehyde from flooring and wallpaper; and VOCs from paints and kitchen furnishings. The emission rates of formaldehyde and VOCs were proportional to air temperature.
3. According to the simulation of the minimum period to be reserved before occupation, newly-constructed airtight houses required about 190-200 days, and naturally ventialed houses with fully-open-windows required about 20-45days, in order to keep the level of radon gas lower than standard. Therefore, with the current practice, the date of occupation should be delayed for about 15 days.

* 중앙대학교 대학원 건축공학과

** 정희원, 경민전문대 건축설비과

*** 정희원, 중앙대학교 건축학과 교수

기 호 설 명

- V : 임의 공간의 체적(m^3)
 Q_0 : 공간내로의 유입공기량(m^3/h)
 C_0 : 유입공기 중의 오염물질농도(mg/m^3)
 S_0 : 초기 함유량
 a : 발생율이 시간에 따라 감소되는 상수(음수는 감소를 의미)
 S : 오염물질 발생량(mg/h)
 Q_1 : 실외로의 유출공기량(m^3/h)
 C_1 : 유출공기 중의 오염물질 농도(mg/m^3)
 $S(t)$: 시간에 따른 발생량

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

공동주택의 실내공기환경은 그동안 에너지절약 설계 및 시공에 따른 건물 기밀화와 단열 강화에 따라 날로 악화되어 가고 있다. 그 원인은 내부와 외부로부터의 매우 복합적인 오염원에 의해 야기되는데, 특히 최근 각종 건축자재로부터 발생하는 가스 및 오염물질은 그 종류와 수가 다양할 뿐 아니라, 인체에 대단히 해로운 것으로 알려지고 있다. 또한 공동주택의 완공 후, 새로운 가구설비와 생활용품의 설치, 그리고 재실자의 행태에 따라 발생하는 오염물질들은 재실자들의 건강을 크게 위협하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 공동주택을 대상으로 실내 공기환경에 대한 이론적 측면과 기준치를 고찰하였고, 공동주택의 실내공기환경 오염상태를 파악하기 위하여 전국 8개 지역을 선정하여 현장실측을 통하여 각종 오염물질의 농도분포를 측정하고 분석하였다. 또한, 공동주택에 사용되는 각종 건축자재에 따른 유해물질의 발생강도를 파악하고자 실험실 측정을 실시하였으며, 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 환기량에 따라 각 오염물질이 기준치 이하로 떨어지는 적정 기간을 찾아냄으로써, 공동주택 실내공기환경의 향상을 위한 근본적인 개선책을 제시하고자 하였다.

1.2 연구의 내용 및 범위

본 연구의 진행방법은 다양한 접근 방법을 이용하여 5단계로 구분되며, 각 단계별 연구 내용 및 범위는 다음과 같다.

(1) 공동주택 실내공기환경 특성 고찰 및 기준치 설정

1단계에서는 각종 자료를 통하여 실내공기환경의 중요성을 파악하고, 특히 공동주택 실내공기 오염물질 발생원 및 인체에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

또한 외국의 실내공기환경 기준에 관하여 집중적으로 자료를 수집하고 이를 우리나라의 기준과 비교하여 문제점을 파악하였으며, 이를 근거로 우리의 실정에 적합한 실내공기환경의 기준치를 설정하였다.

(2) 공동주택 실내공기환경의 실측

2단계는 공동주택 실내공기환경 실태에 대한 현장조사로서, 서울 및 신도시 지역을 포함하여 전국 8개 지역을 선정하여 공기환경 요소인 휘발성 유기용제, 포름알데히드, 라돈, 이산화탄소, 분진 및 온열 환경 요소인 온도, 습도, 기류 속도 등을 측정하였고, 그 결과를 분석하였다.

(3) 각 재료별 오염물질 발생강도의 실험실 측정

3단계는 실험실 측정으로서, 공동주택에 사용되는 각종 마감재료에 따른 유해물질의 발생강도를 파악하고자, 크기 $1.0m \times 1.0m \times 1.0m$ 인 실험을 제작하여, 콘크리트, 석고보드, 페인트, 벽지, 타일, 바닥모노륨, 카펫 등의 재료에서 발생하는 오염농도를 측정하였다.

(4) 실내 공기오염농도 예측 시뮬레이션

4단계에서는 3단계의 실험실 측정에서 확보한 오염물질의 발생 강도를 근거로 이를 실제의 신축 공동주택에 적용시키고, 각 오염물질이 설치 및 시공된 후 환기량과 시간 경과에 따라 변화하는 실내 오염농도를 예측할 수 있는 수치해석모델을 분석 및 유도하여 이를 전산 프로그램화한 후, 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 공동주택에서의 쾌적환경유지(기준치 이하)를 위한 오염물질의 허용기준 도달시간을 산정하였다.

(5) 공동주택 실내공기환경의 개선안 제시

5단계에서는 1, 2, 3, 4단계에서 실시한 이론 조사, 현장 실측, 실험실 측정 및 실내 공기오염농도 예측 시뮬레이션의 연구 결과에 따라 공동주택 실내공기환경을 건강하고 쾌적하게 유지시킬 수 있는 근본적인 대안을 제시하고자 하였다.

2. 실내공기 오염물질의 특성 및 기준

2.1 실내공기 오염물질의 발생원 및 인체에 미치는 영향

건물의 실내공기환경(IAQ : Indoor Air Quality)은 다른 어떠한 단일환경보다도 복잡한 문제이다. 최근의 조사에 따르면, 실내의 특정장소에서 이루어지는 특정작업과 행위에 따라 900여종 이상의 서로 다른 오염물질들이 존재한다고 보고되고

있으며, 실내공기의 성분 중에 1ppb와 1ppm 사이의 농도를 가진 성분이 250여 가지 이상이라고 하는데, 이중에서 공동주택의 주된 실내공기 오염물질에는 일반적으로 부유분진(TSP), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO₂), 라돈(Radon), 포름알데히드(Formaldehyde), 휘발성유기용제(VOCs; Volatile Organic Compounds), 미생물, 악취(Odor) 등이 있다. 각 오염물질의 발생원 및 인체에 미치는 영향은 다음 Table 1, Table 2와 같다.

2.2 실내공기환경 기준 고찰 및 기준치 설정

일반적으로 실내공기환경 기준에서는 일산화탄소(CO) 및 이산화탄소(CO₂) 농도로서 다른 오염물질을 대표시키고 있으나, 노동환경과 달리 일반 실내환경에서는 어느 특정 오염 물질이 특별히 많은 경우는 드물고, 한 물질로서는 비교적 농도가

Table 1 Source and Health Effect of Various Indoor Air Pollutants

Pollutant		Source	Health Effect
A R O M A T I C S	Benzene	Latex caulk, varnishes, particleboard, stains	Carcinogen, respiratory tract irritant
	Toluene	Caulk, latex paint, carpet, solvents, wallpaper, vinyl floor covering	Narcotic, may cause anemia
	Xylene	Adhesives, wallpaper, sheetrock, floor covering, floor lacquer, varnish	Narcotic, irritant, affects heart, liver, kidney and kidney system
	Styrene	Plastics, paints, resins, synthetic rubber	Narcotic, affects central nervous system
	Acetone	Particleboard	Respiratory tract irritant
	Formaldehyde	<ul style="list-style-type: none"> - Construction material: Insulation, pressed wood products - Paper products, carpeting, fiberglass products, clothing, resilient flooring - Smoking, cosmetics, combustion sources 	<ul style="list-style-type: none"> - Eye irritation, nose and sinus irritation, sore throat, runny nose, sinus congestion, cough - Difficulty in breathing, chest pain, wheezing
	Radon	<ul style="list-style-type: none"> - Soil and rock beneath or surrounding a building structure, water supplies, building materials, and the natural gas that is used for cooking and heating purposes 	<ul style="list-style-type: none"> - Deposit in various regions of the respiratory tract(the surface tissue of the bronchi in the lungs is damaged the most by the alpha particles)
	Suspended Particles	<ul style="list-style-type: none"> - Gas cooking, kerosene heaters, tobacco smoking 	<ul style="list-style-type: none"> - Silicosis, respiratory trouble, lung disease

Table 2 Health Effect of Carbon Monoxide(CO) and Carbon Dioxide(CO₂)

	Source	Health Effect
Carbon Monoxide	- Gas Range, Cigarettes, Space Heaters, Combustion Gas, Resurfacing machines in ice skating rinks	- Carboxyhemoglobin Level COHb 10% Decided headache; irritable; easily fatigued; judgment disturbed; possible dizziness; dizziness; dimness of vision
Carbon Dioxide	- Kerosene Heaters, Gas Stoves and Ovens, Tobacco Smoking	- 2000~5000ppm(0.2~0.5%) cause moderate headache

Table 3 STANDARD/GUIDELINE related to IAQ

COMPOUND	Standard/Guideline					Establishment Value
	Foreign			Domestic		
VOCs	ACGIH		Poland			
	average concentration	allowed concentration	national standard			
Benzene	0.01~0.04 mg/m ³	1 ppm	-		-	20 ppb
Toluene	0.015~0.07 mg/m ³	375 mg/m ³	0.2mg/m ³ (53.05ppb)		-	50 ppb
Xylene	0.01~0.05 mg/m ³	435 mg/m ³	0.1mg/m ³ (23.04ppb)		-	50 ppb
Formaldehyde (ppb)	WHO	Sweden	Finland	German	ASHRAE	100 ppb
	* R.V	New Building	R.V	R.V		
	100	100	100	100		
Radon (pCi/L)	Sweden	England	EPA	ASHRAE		2.0 pCi/L
	New Building	New Building		yearly average		
	1.9	3.0		1.0		
Suspended Particles (mg/m ³)	EPA			Japan		architectural code
	long time	short time	Office indoor standard			
	0.055	0.15	0.15			

* R.V : recommendation value

낮은 여러 종류의 것들이 혼합되어 있는 경우가 보통이다. 실내에 거주하는 재실자에게 쾌적한 건축 환경을 조성해 주기 위해서는 실내환경 특성에 맞는 허용기준을 설정하는 작업이 우선되어야 한다. Table 3은 실내공기환경에 관한 국내외의 관련기준을 비교, 검토하여 국내 주거공간에서 적절한 실내공기환경 기준치를 설정하였다.

3. 공동주택의 실내공기환경 측정

3.1 측정 개요

본 연구에서는 공동주택의 실내공기환경 실태를 조사하기 위하여 국내 8개 지역을 대상으로 시공 후 입주하기 직전의 신축공동주택 14개소와 기존 공동주택 8개소를 선정하여 측정하였으며, 그 세부 내용은 다음과 같다.

Table 4 Measuring overview of IAQ

(a) Newly-Constructed Apartment Building

Measuring Area		Construction	Measurement Date
Apt 1	Seoul H.J	R. C	1994. 2. 3
Apt 2	Anyang		1994. 2.24
Apt 3	Boondang		1994. 3.19
Apt 4	Seoul J.K		1994. 5. 7
Apt 5	Youngju		1994. 5.24
Apt 6	Andong		1994. 5.25
Apt 7	Ulsan		1994. 5.26
Apt 8	Inchon		1994. 7.12
Apt 9	Kangwha		1994. 7.14
Apt 10	Cheju		1994. 7.24
Apt 11	Boondang	P. C	1994. 7.20
Model 12	Seoul Y.S	Model House (Wooden)	1994. 2.23
Model 13	Ulsan		1994. 5.27
Model 14	Youju		1994. 7.19

(b) Existing Apartment Building

	No. of Samples							
	Apt 1	Apt 2	Apt 3	Apt 4	Apt 5	Apt 6	Apt 7	Apt 8
Area	Seoul H.J	Seoul M.I	Seoul C.D	Seoul J.S	Seoul B.W	Seoul T.C	Seoul K.J	Seoul C.S
Measurement Date	1995.2. 9	1995.2.11	1995.2.15	1995.3.11	1995.3.18	1995.3.30	1995.4. 1	1995.7.24
Heating System	C	C	I	C	I	C	I	C
Period of Occupation	3 years	10 years	11 years	11 years	8 years	10 years	2 years	2 years
State of Repaire		'93. 4 change of wall paper		'94. 4 change of wall paper & furniture		'90. 6 change of wall paper	'94. 5 change of wall paper	'95. 5 change of floor ring
Rate of Furniture Occupation	28%	16%	21%	55%	52%	21%	38%	54%
Members of Family	3	3	4	2	2	2	6	4
Numbers of Smokers	0	0	0	0	1	0	1	1

3.2 측정기기

본 연구에서 사용된 측정기기는 다음 Table 5와 같다.

3.3 측정 결과

공동주택의 공기환경을 현장측정 조사한 결과는 다음과 같다.

(1) 휘발성 유기용제(Volatile Organic Compounds)

실내에 존재하는 여러 VOCs 중에서, 다량으로 존재하는 방향족 탄화수소인 벤젠, 톨루엔, 크실렌을 분석하였다. 특히, 벤젠을 제외한 톨루엔과 크실렌의 경우, 신축공동주택에서는 실내/실외 농도비를 비교분석한 결과 실내농도가 약 6~10배 높게 검출되었으며, 기존 공동주택에서는 각각 749ppb/N.D., 143ppb/N.D.로 나타났다. 특히 신

축보다 기존공동주택에서 그 농도비가 훨씬 높게 나타났는데, 이와같은 결과는 새로운 건물이 지어진 후 초기에는 건물재료 등으로부터 많은 휘발성 유기용제의 농도분포를 보이다가, 건물의 사용연수에 따라 점차 감소하지만 채실자들의 사용기기, 가구재 및 생활패턴 등에 의해 시간이 지남에 따라 오히려 그 농도가 점차 증가하고 있음을 확인할 수 있었다(Table 6, Fig.1).

(2) 포름알데히드(Formaldehyde)

포름알데히드의 경우 실내/실외 농도는 신축주택에서 평균 158.0ppb/79.1ppb, 기존주택에서 평균 95.1ppb/53.1ppb의 분포를 보이고 있었다. 특히 신축주택에서 실내농도가 실외보다 약 2배 정도 높게 나타났는데, 이는 ASHRAE 기준치(100ppb)를 초과하는 값으로 이에 대한 대책이 이루어져야 하겠다. 또한 기존주택인 경우 평균 95.1ppb로 신축주택보다 그 농도가 낮게 나타났는

Table 5 Measuring equipment

Compound	Measuring equipment
VOCs	Air Sampler(Gilian co.)+Solvent Tubes(Charcoal), GC(SRI 8610B Gas Chromatograph) analysis NIOSH Manual(1501)
Formaldehyde	Monitoring Kit(LaMotte co., SKC, Inc.)
Radon	Radon Detector & Analysis System(Model TN-WL-2;TOMSON & NIELSEN ELECTRONICS Ltd.)
CO ₂	Portable Dioxide Analyzer(Canada Ltd. measuring range : 0~10,000ppm)
Temperature, R.H, Air velocity	Portable Digital Thermometer(C822-2), Psychrometer(C846-2), Anemometer

Table 6 Average Value of VOCs Concentration in Apartment Buildings

VOCs(ppb)		Benzene	Toluene	Xylene	
Newly-Constructed	R.C, P.C	indoor	16.3	85.0	68.42
		outdoor	22	6.0	12.15
	Model House	indoor	21.82	61.39	31.52
		outdoor	63.43	8.07	N.D
Existing	R. C	indoor	N.D	749.0	143.0
		outdoor	N.D	N.D	N.D

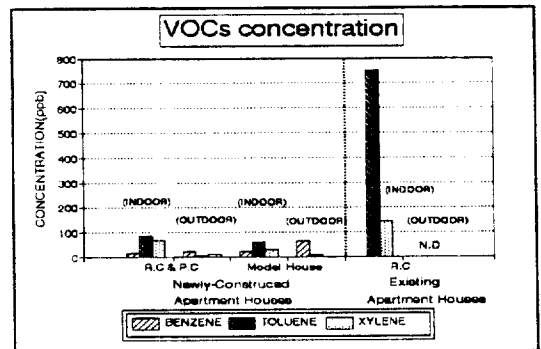


Fig.1 Measured VOCs concentration values

데, 이와같은 결과는 포름알데히드의 주요 방출원이 건축자재 등으로 건축자재의 수명 등이 경과함에 따라 점차 그 방출량이 감소하고 있음을 확인할 수 있었다(Table 7, Fig.2).

(3) 라돈

라돈 측정결과 신축주택에서 최고 4.57pCi/L, 평균 1.98pCi/L로 실내가 실외농도보다 약 16배 가량 높게 나타났다. 벽체 구조별로 살펴볼때, R.C 1.98pCi/L, P.C 0.33pCi/L, 모델하우스 0.03pCi/L로 나타났는데, 이는 라돈의 주요 방출원이 흙, 모래, 자갈 등의 토양과 그 원료로 만든 시멘트, 콘크리트 및 산업폐기물의 부산물인 석고보드 등에 존재하며 공기 중으로 방출되고 있음을 확인할 수 있었다.

한편, 기존주택에서 실내/실외 농도분포는 0.80/0.46pCi/L로 실내가 실외보다 약 2배정도 높게 검출되었으나, 신축주택의 농도보다는 훨씬 줄어들

고 있었다. 따라서 공동주택에서 라돈은 반감기(half-life) 및 환기 등에 의해 시간이 경과됨에 따라 점차 감소하고 있음을 알 수 있었다(Table 8, Fig.3).

(4) 이산화탄소, 온도, 습도 및 기류속도

CO₂, 온도, 습도 및 기류분포를 살펴보면, 먼저 CO₂ 농도는 신축인 경우 외기농도와 거의 같았고, 기존주택은 채실자 등에 따라 전반적으로 실내가 실외보다 약간 높게 검출되었으나, 이와같은 값들은 모두 기준치에 훨씬 미치지 못하고 있었다(Table 9, Fig.4).

또한, 온도 및 습도의 분포는 외기온 및 난방가동상태에 따라 일정한 분포를 보이고 있었고, 기류 분포에서는 신축주택의 경우 거의 기류의 흐름이 없는 것으로 나타남으로써, 기밀한 구조를 유지하고 있음을 알 수 있었다(Table 10, Fig.5).

Table 7 Average Value of Formaldehyde Concentration in Apartment Buildings

Formaldehyde(ppb)		indoor	outdoor	I/O ratio
Newly-Constructed	R.C, P.C	158.0	79.1	2.0
	Model House	421.2	121.5	3.5
Existing	R.C	95.1	53.1	1.8

Table 8 Average Value of Radon Concentration in Apartment Buildings

라돈(pCi/L)		indoor	outdoor	I/O ratio
Newly-Constructed	R.C	1.98	0.12	16.5
	P.C	0.33	0.24	1.4
	Model House	0.03	0.02	1.5
Existing	R.C	0.80	0.46	1.7

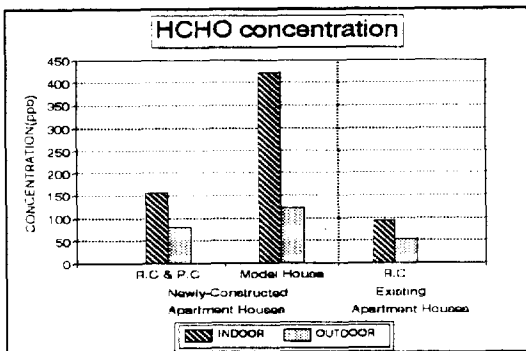


Fig.2 Measured HCHO concentration values

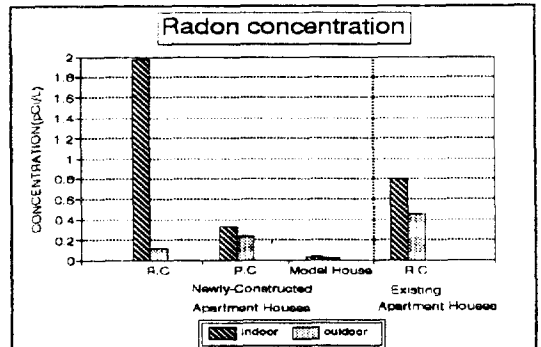


Fig.3 Measured Radon concentration values

Table 9 Average Value of CO₂ Concentration in Apartment Buildings

CO ₂ (ppm)		indoor	outdoor	I/O ratio
Newly-Constructed	R.C, P.C	399	283	1.4
	Model House	395	363	1.1
Existing	R.C	816	331	2.5

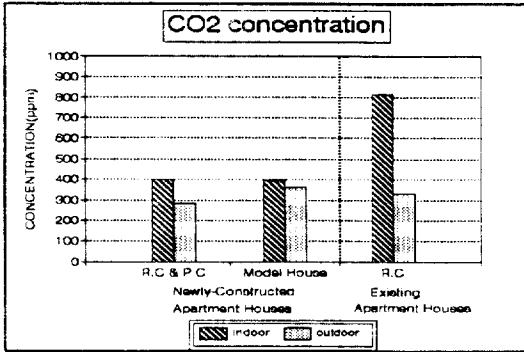


Fig.4 Measured CO₂ concentration values

Table 10 Average Value of Temperature, Humidity & Air Velocity in Apartment Buildings

		Temperature (°C)	Humidity (%)	Air velocity (m/s)
Newly-Constructed	indoor	17.8	50	0.08
	outdoor	17.1	57	0.8
Existing	indoor	22.7	33.8	N.E
	outdoor	9.8	36.3	N.E

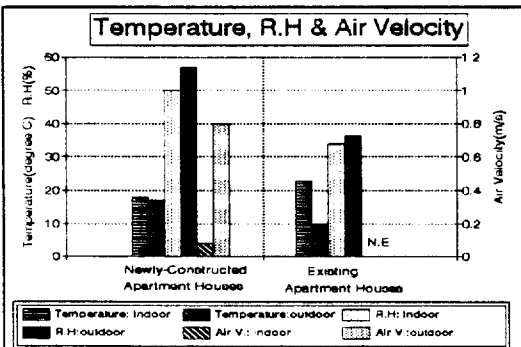


Fig.5 Measured Temperature, Humidity & Air Velocity values

Table 11 Measuring material and methodology of chamber testing

Compound	Material	Methodology
Radon	R.C	1) Measuring the concentration of pollutant while each material is put in the test chamber(before that, establish the initial condition to reduce experimental error)
	P.C	
	Gypsumboard	
VOCs & Formaldehyde	Kitchen Furniture	2) Measuring the emission rate of pollutant by changing temperature condition
	Vinyl floor covering	
	Tile	
	Wallpaper	
	Paint	
	Carpet	

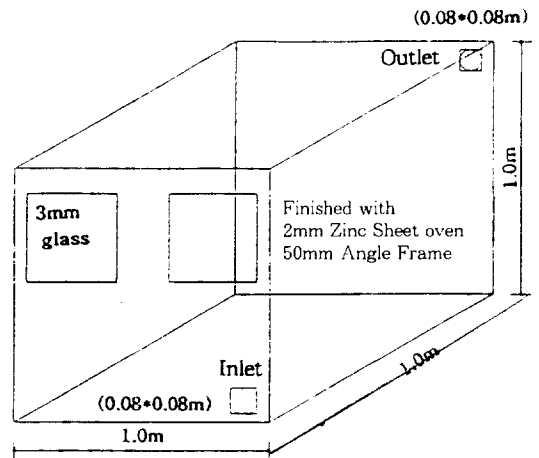


Fig.6 Perspective of test chamber

4. 건축재료의 오염물질 발생 강도에 대한 실험실 측정

4.1 실험실 측정 개요

공동주택의 시공과정에서 투입된 건축구조재, 실내 마감재를 비롯한 각종 건축재료와 입주 후 새로운 가구의 도입, 개보수 및 생활용품 등의 사용으로 인하여 발생하는 오염물질의 발생강도를 측정하고자 실험실측정을 실시하였다.

실험실측정은 크기 1.0m×1.0m×1.0m³ (50mm angle frame에 함석 마감)의 실험 모델을 제작하고, 제작된 실험 모델 내에 각종 건축재료를 실제의 상황과 유사하게 설치한 후, 그에 따른 각종 오염물질의 발생강도를 측정하였다(Fig.5, Table 11 참조).

4.2 실험실 측정결과

(1) 라돈 발생강도 측정결과

Table 12에서와 같이 단위 표면적당(m²)라돈

발생강도의 측정결과는 R.C, P.C, 석고보드의 세가지 재료 중 석고보드에서 가장 높게 나타났다. 특히 산업폐기물의 원료로 제작되는 국내석고보드는 제조회사에 따라 R.C의 3.5배에서 8.7배까지 높게 검출되었고, 천연석고를 주원료로 하는 미국산 석고보드는 상대적으로 라돈의 방사량이 낮게 검출됨을 알 수 있었다.

(2) 포름알데히드 및 휘발성 유기용제(VOCs) 발생강도 측정결과

Table 13에서와 같이 실내마감재료에 대한 오염

Table 12 Emission rate of radon gas from R.C, P.C and Gypsumboard specimen

Material		Average Temperature	Average Humidity	Radon emission rate(pCi/m ² h)
R.C		31.0℃	76.9%	600
P.C		20.3℃	45.4%	430
Gypsumboard	K co.(domestic)	32.5℃	67.5%	2,113
	B co.(domestic)	28.9℃	87.9%	5,235
	A co.(foreign)	30.6℃	69.8%	931

Table 13 Emission rate of formaldehyde and VOCs from building materials

Material	Average Temp. (℃)	Average R.H. (%)	Emission Rate (ppb/m ² h)			
			Formaldehyde	VOCs		
				Benzene	Toluene	Xylene
Kitchen Furniture	27.7	62.4	107.41	21.5	1,720	N.D
	43.4	35.6	173.45	41.7	4,245	N.D
	51.2	26.2	190.12	23.7	7,419	N.D
Vinyl floor covering	25.8	75.9	1,030.3	N.D	N.D	N.D
	31.7	38.1	1,993.4	N.D	N.D	N.D
	39.3	35.4	4,728.0	N.D	N.D	N.D
Tile	22.2	37.0	136.0	318.8	9,392	N.D
	28.5	67.6	418.2	1,107	12,360	N.D
	36.2	47.6	490.1	1,893	13,994	N.D
Wall paper	21.8	56.8	418.5	N.D	N.D	N.D
	32.5	44.5	1,020.4	N.D	N.D	N.D
	41.9	32.0	1,561.4	N.D	N.D	N.D
Paint	25.5	56.7	79.8	4,969	2,190	3,697
	31.6	50.8	255.1	6,054	2,648	4,075
	40.4	43.8	408.2	7,608	3,545	5,072
Carpet	13.4	26.4	53.0	N.D	N.D	507

물질 발생강도 측정결과, 포름알데히드는 바닥모노륨, 벽지, 타일, 주방가구, 페인트, 카펫의 여섯가지 실내마감재료에서 모두 검출되었고, 특히 바닥모노륨에서 가장 높게 나타났으며, 벽지재료에서도 비교적 높은 분포를 나타내고 있음을 알 수 있었다.

한편, 휘발성 유기용제 중 벤젠과 톨루엔인 경우는 주방가구, 타일, 페인트 등에서 주로 검출되었다. 특히 페인트에서는 벤젠이 그리고 타일에서는 톨루엔이 가장 높은 방사량을 보이고 있었다. 또한 크실렌인 경우는 페인트와 카펫에서 주로 검출되고 있었다. 따라서 실내마감재중 모노륨과 벽지에서는 포름알데히드가 그리고 페인트에서는 휘발성 유기용제 등의 오염물질이 다량으로 검출되고 있음을 알 수 있었다.

또한, 기존 연구결과와 마찬가지로 포름알데히드 및 휘발성유기용제의 두 물질 모두 온도상승에 따라 그 방사량이 각각 증가하고 있음을 확인 할 수 있었다.

5. 실내공기오염 농도 예측 시뮬레이션

5.1 시뮬레이션 개요

본 연구에서는 앞에서 수행된 현장실측과 오염농도 발생강도의 실험실 측정값을 근거로, 검증된 환기모델식을 적용시켜 공동주택에서의 환기량에 따른 실내공기오염농도 변화량을 예측하고자 하였다.

특히, 공동주택 중에서 기존공동주택은 입주 후 생활패턴 및 사용용품 등에 따라 환기량 및 오염농도 변화를 예측하기가 어려운 점을 감안하여, 시공 후 입주를 기다리는 신축공동주택을 대상으로 실시하였다.

5.2 환기량에 따른 실내공기오염 농도예측 모델 제시

일반적으로 임의의 체적(Vm³)내에 오염물질 발생원이 존재하고, 환기를 위해 실내로 도입되는 외기 중에도 오염물질이 포함되어 있으며, 실외로 배출되는 공기 중에도 오염물질이 포함되어 있을 때,

공간내 오염물질의 증감은 질량보존법칙에 의하여 다음과 같이 나타낼 수 있다(Fig.7 참조).

즉, 공간내 오염물질의 증감=공기유입에 의한 오염물질의 변화+공간내 오염물질 발생-공기유출에 의한 오염물질 변화와 같이 나타낼 수 있다.

이것을 식으로 나타내면

$$Q_0 C_0 dt + S dt - Q_i C_i dt = V dC_i \tag{1}$$

식 (1)에서 유입되는 공기량과 유출되는 공기량이 같다고 하고(즉, Q₀=Q_i=Q), 초기농도(C₁)는 외기농도와 같다고(즉 C₁=C₀) 가정한다면 다음과 같이 변형 될 수 있다.

$$\text{즉, } C_i = \frac{S}{Q} [1 - \exp(-\frac{Qt}{V})] + C_0 \tag{2}$$

이 때, 오염물질 발생량(S)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{즉, } S(t) = S_0 \times \exp - a \times t \tag{3}$$

5.3 공동주택의 실내 환기량 예측

공동주택에서의 실내환기량 예측은 개구부 조건 즉, 완전개방, 반개방, 그리고 밀폐의 세가지 조건에 따라 각각 환기량을 산출하였다.

일반적으로 환기량을 예측하기 위해서는 현장측정 및 풍동실험 등을 통한 정확한 입력자료가 필요하나, 본 연구에서는 현장실측, 문헌 및 통계자료를 근거로 실내외 온도차와 바람에 의한 자연환기

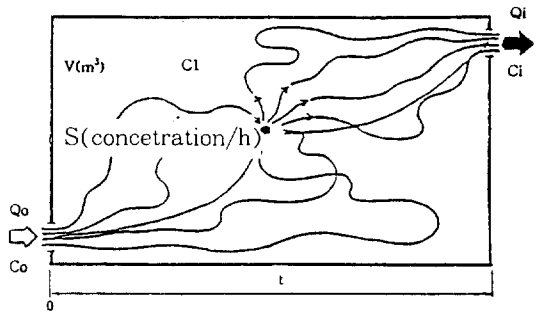


Fig.7 Ventilation rate of a given space and resultant variation of pollutant concentration

Table 14 Assessment of ventilation rate in apartment building(floor area of 155.4m²)

Opening Type		Size(m)	Closed (m ²)	Semi-closed (m ²)	Open (m ²)
Series composition	R1	1.98×1.48	0.0021	1.5	2.9
	R2	1.23×1.65	0.0018	1.0	2.0
	Kitchen	2.68×0.505	0.0017	0.7	1.4
	Living-R.	2.98×2.36	0.0033	2.3	7.0
	R3	2.98×2.01	0.0035	3.0	6.0
	R4	1.98×1.48	0.0021	1.5	2.9
Total αA			0.00332	2.03	4.1
Ventilation Volume (Q:m ³ /h)			30	7,525	15,220

량으로 산출하였다(Table 14 참조).

5.4 공동주택 공정표 분석 및 오염물질 발생량 산정

(1) 공동주택 공정표 분석

공동주택에서의 공기오염원인 건축구조재 및 마감재 등이 설치되는 시기 등을 보다 구체적으로 알아보기 위하여 Table 15와 같이 공동주택이 신축되는 과정을 단계별 공정으로 분석하였다.

일반적으로 공동주택에서 대부분의 실내마감재료는 설치물의 도난 방지 등을 이유로 입주되는 시점의 약 6개월 내지 3개월 전부터 밀폐된 상태에서 설치되고 있음을 감안 할 때, 본 연구에서는 Table 15에와 같이 입주 약 6개월전에 골조공사가 전부 완료된 직 후 부터 본격적으로 방출되고 있다고 가정하였다.

(2) 공동주택의 오염물질별 발생량 산정

4장의 실험실 측정결과를 근거로 신축공동주택에서 발생할 수 있는 실내마감재료별 공기오염물질의 종류와 발생량을 계산한 결과는 Table 16과 같다.

5.5 공동주택 실내공기오염 농도 예측 시뮬레이션

(1) 시뮬레이션 개요

본 연구에서는 신축공동주택 실내마감재료에서 발생하는 오염물질 중 현장실측과 실험실 측정을

통하여 그 농도 값과 단위시간당 발생량을 비교적 정확히 알 수 있고, 시간에 따른 발생량의 감소율(반감기)을 알 수 있는 라돈(반감기 3.8일) 오염물질을 중심으로 환기이론 수치해석모델에 근거한 간단한 전산프로그램을 통하여 실내공기 오염농도 예측 시뮬레이션을 실시하였다(Table 17 참조).

(2) 실내공기오염 농도 예측 시뮬레이션 결과 신축공동주택(47평형) 개구부 상태에 따라 실내 라돈농도가 설정 기준치(2pCi/L) 이하로 되는 기간(t)을 구하는 시뮬레이션을 실시한 결과는 Table 18과 같다.

(3) 신축공동주택에서 골조공사가 완료된 후 라돈오염물질이 설정 기준치(2pCi/L) 이하로 되는 기간(t)은 47평(155.4m²) 기준으로 밀폐시 200일, 반 개방시 45일, 완전개방시 25일로 각각 나타났다(Fig.8 참조).

(4) 내부마감공사가 진행되면서 창틀만 설치하고 작업자들이 수시로 출입하는 1.5개월간은 완전 개방된 상태로 하고, 그 후 유리창을 설치하고 바닥공사 및 가구설치가 이루어지는 1.5개월간은 반개방시킨 후 입주시까지는 창을 밀폐하는 경우에는, 라돈이 설정 기준치인 2pCi/L이하로 떨어지는 기간(t)은 밀폐 후 54일, 골조공사 후 총 144일인 것으로 나타났다(Fig.9 참조).

(5) 1.5개월 동안 개구부를 완전개방하고 다시 1.5개월은 반개방하는 상태에서도 그 후 입주시까지 밀폐가 된다면 입주시 실내라돈농도는 기준

Table 15 Construction process of apartment buildings(15 story)

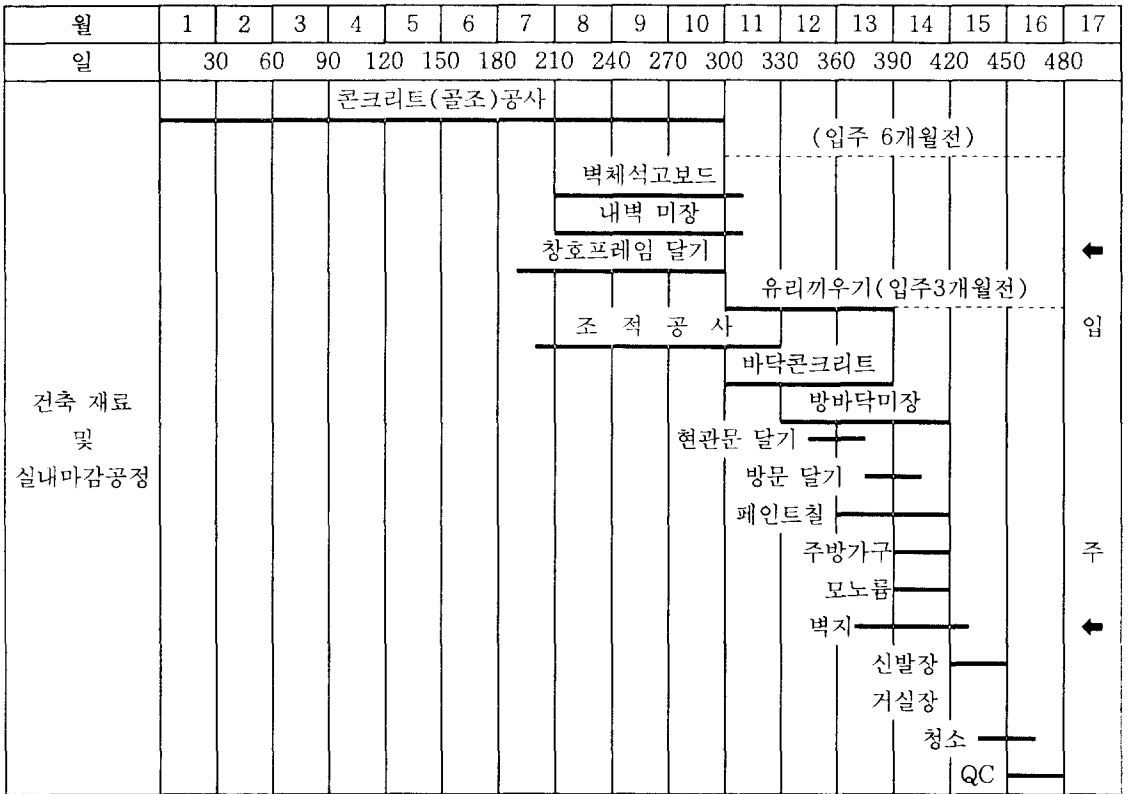


Table 16 Sorts and emission rate of indoor air pollutants from building materials in newly-constructed apartment buildings

(floor area of 155.4m²)

Pollutant	Source		47 Pyung (155.4m ²)
	Material	Emission Rate (chamber testing value)	
Radon	Gypsumboard	790 pCi/h·m ²	350,870 pCi/h
	Concrete	600 pCi/h·m ²	
VOCs	Benzene	Paint	940 ppm/h
		Tile	20 ppm/h
	Toluene	Tile	570 ppm/h
		Paint	414 ppm/h
Xylene	Paint	700 ppm/h	
Formaldehyde	Vinyl floor covering	1,030 ppm/h·m ²	20,560 ppm/h
	Wallpaper	419 ppm/h·m ²	55,070 ppm/h
	Tile	136 ppm/h·m ²	8,220 ppm/h
	Paint	80 ppm/h·m ²	15,080 ppm/h

Table 17 Simulation of radon gas concentration in apartment buildings

Sorts		Estab. Value	Status of Opening Control (before moving into house)
Simulation 1			Opening status; open, semi-open, closed
C O M P	Simulation 2	2pCi/L	45days open + 45days semi-open + closed(t)
	Simulation 3		45days open + 45days semi-open + semi-open(t)
	Simulation 4		45days semi-open + semi-open(t)

Table 18 Result of simulation of radon gas concentration

Pyung & Volume	Simulation	Ventilation volume (m ³ /h)		Standard Value	Requiring period (days)	
47pyung & 307m ³	Simulation 1	closed	30m ³	2.0 pCi/L	200	
		semi-open	7,500m ³		45	
		open	15,200m ³		25	
	C O M P	Simulation 2	45days open + 45days semi-open + closed		144	
		Simulation 3	45days open + 45days semi-open + semi-open		128	
		Simulation 4	45days semi-open + semi-open		140	

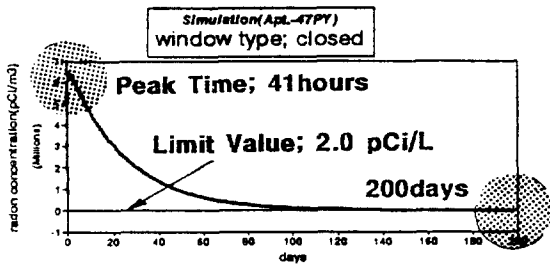


Fig.8 Simulation-1(closed)

치를 초과하고 있는 것으로 나타났다. 이때, 개구부를 밀폐시키지 않고 계속 반 개방상태로 하여 일정기간 동안 계속 자연환기를 시킨 후 다시 밀폐시킨다 할지라도 실내라돈 농도가 기준치를 초과하지 않는 기간은 38일, 즉, 골조공사 후 총 128일로 나타났다(Fig.10 참조).

(6) 골조공사가 완료된 후 창호설치와 동시에 개구부가 반개방상태 일때 실내라돈 농도가 기준치 이하로 내려가는데도 약 45일이 소요되고 있었다. 그러나 45일 경과 후에 다시 밀폐시킨다면 실내

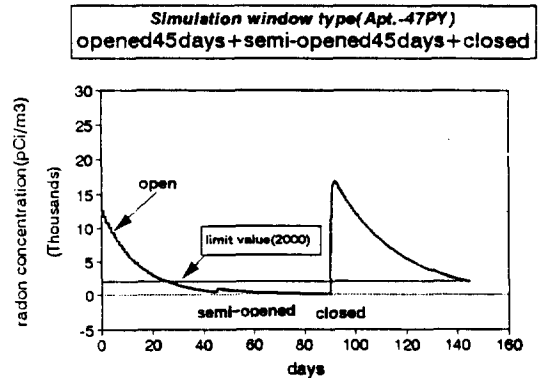


Fig.9 Simulation-2(combination of openings; open(45days) + semi - open(45days) + closed)

라돈농도는 다시 기준치를 초과하고 있었는데, 이때 초기부터 계속 반개방 상태로 환기를 시킨다면 다시 밀폐하여도 실내 라돈농도는 기준치 이하로 떨어지는 기간은 140일로 나타났다(Fig.11 참조).

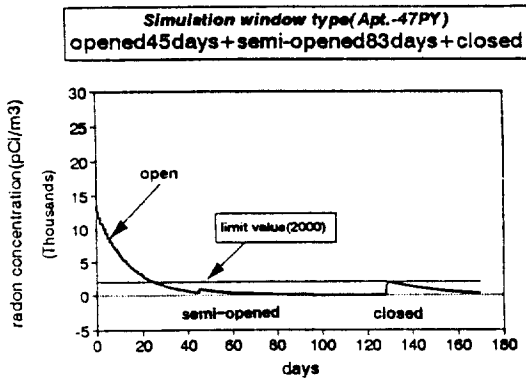


Fig.10 Simulation-3(combination of openings; open(45days) + semi - open(45days) + semi-open)

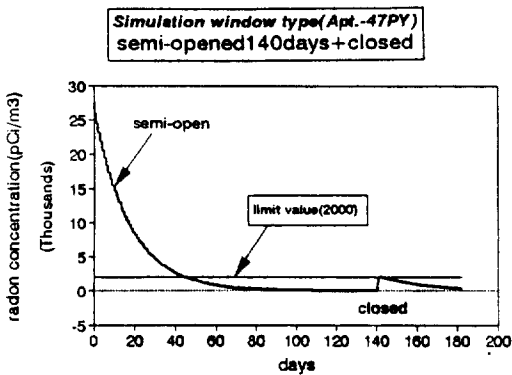


Fig.11 Simulation-4(semi-open)

6. 결 론

본 연구는 국내 공동주택(신축 및 기존)을 대상으로, 공기환경에 대한 이론적 측면과 기준치를 고찰한 후, 전국 8개 지역을 선정하여 공기환경오염 실태를 측정조사 하였으며, 실험실 측정을 통하여 각종 건축 마감재료에서 발생하는 오염물질의 발생 강도를 파악하였다. 또한 공동주택의 개구부상태 및 환기량에 따라 건축재료에서 발생하는 오염물질이 기준치 이하로 떨어지는 적정기간을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 찾아냄으로써, 궁극적으로는 공동주택 실내공기환경의 향상을 위한 개선안을 제시하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 공동주택 실내공기환경을 측정조사한 결과를 요약하면, 신축공동주택에서 포름알데히드의 오염농도는 기준치를 초과하고 있었고, 휘발성 유기용제와 라돈은 부분적으로 설정기준치를 초과하거나 상회하는 값으로, 특히 실내농도가 실외보다 훨씬 높게 나타났다. 한편, 기존공동주택에서는 휘발성 유기용제 중 특히 독성이 강한 톨루엔과 크실렌의 농도가 기준치를 훨씬 초과하는 높은 농도분포를 보이고 있었다. 그러나, 포름알데히드와 라돈은 건물수명 및 사용기간 경과 등에 따라 점차 그 농도가 감소하고 있음을 알 수 있었다.

둘째, 각종 건축재료에서 발생하는 오염물질의 발생강도에 대한 실험실 측정결과를 요약하면, 먼저 R.C, P.C, 석고보드의 세가지 재료 중, 단위 표면적당(m²) 라돈 발생강도의 측정결과는 석고보드에서 가장 높게 나타났다. 특히 산업폐기물의 원료로 제작되는 국내석고보드는 제조회사에 따라 R.C의 3.5배에서 8.7배까지 높게 검출되었고, 천연석을 주원료로 하는 미국산 석고보드는 상대적으로 라돈의 방사량이 낮게 검출됨을 알 수 있었다.

그리고, 여섯가지 실내마감재료에 대한 오염물질 발생강도 측정결과, 포름알데히드는 바닥모노륨, 벽지, 타일, 주방가구, 페인트, 카페의 여섯가지 실내마감재료에서 모두 검출되었다. 특히 바닥모노륨에서 가장 높게 나타났으며, 벽지재료에서도 비교적 높은 분포를 나타내고 있음을 알 수 있었다. 한편, 휘발성유기용제 중 벤젠과 톨루엔인 경우는 주방가구, 타일, 페인트 등에서 주로 검출되었다. 특히 페인트에서는 벤젠이 그리고 타일에서는 톨루엔이 가장 높은 방사량을 보이고 있었다. 또한 크실렌인 경우는 페인트와 카펫에서 주로 검출되고 있었다. 따라서 실내마감재 중 모노륨과 벽지에서는 포름알데히드가 그리고 페인트에서는 휘발성 유기용제 등의 오염물질이 다량으로 검출되고 있음을 알 수 있었다.

셋째, 신축공동주택에서 라돈오염원인 콘크리트 및 석고보드 등이 시공된 후, 개구부 상태 및 환기량에 따라 실내라돈농도가 기준치 이하로 떨어지는 적정기간을 찾아내는 컴퓨터 시뮬레이션 결과는 다음과 같다.

즉, 47평형 R.C 구조의 신축공동주택에서, 골조공사 이후 창호 밀폐시에는 약 200일로 나타났다. 그러나 창호를 완전개방하여 자연환기를 시킬 경우에는 골조공사 후 약 25일에서 45일로 매우 짧아지고 있었고, 또한 개구상태를 적절히 조절하여 자연환기를 적극 도입했을 경우 약 124일에서 144일 정도로 짧아지고 있었다.

따라서, 신축공동주택에서 라돈에 대한 실내공기환경을 향상시키기 위해서는 현재의 입주시기를 약 20일정도 늦추거나 입주전 일정기간 동안 개구부를 개방하여 오염물질을 충분히 배출시키는 것이 바람직하다.

이상과 같은 연구결과를 종합 검토한 결과, 공동주택에서의 실내공기질(IAQ)의 향상을 위한 근본적인 대안을 제시하면 다음과 같다.

첫째, 공동주택의 설계자, 시공자 및 건축주 모두 실내공기환경의 중요성을 제인식하고 실내공기환경에 영향을 미치는 각종 요소를 고려하여 보다 나은 실내공기의 질(IAQ)을 확보할 수 있는 설계, 시공, 감리 및 관리가 되도록 적극 노력하여야 한다.

둘째, 새로운 실내공기환경에 대한 요구에 대응할 수 있는 방안의 하나로 국내 실내공기환경 기준의 개선 및 재정립이 요구된다. 즉, 지금까지는 실내공간을 기준의 개선 및 재정립이 요구된다. 즉, 지금까지는 실내공간을 단지 작업공간이라는 관점하에 실내공기의 오염상태만을 규제하는 데 주안점을 두었으며, 그나마 거주환경에 관한 기준은 미비한 실정이다. 따라서, 앞으로는 공기의 상태 뿐만 아니라 발생원의 규제를 통해 근본적인 개선 대책이 요구되며, 특히 거주환경의 다양한 오염원에 관하여도 구체적인 기준 설정이 이루어져야 할 것이다.

세째, 신축공동주택에서 사용되는 각종 건축재료의 합리적인 선택을 통하여 실내공기환경의 오염원을 조절하는 방법이다. 즉, 모든 건축재료는 입주자의 건강에 해로운 영향을 미치지 않는 것으로 설계 및 시공되어야 하고, 건축재료로부터 발생하는 발암 및 유독물질의 방출량을 입주자에게 서면으로 열람으로서 기술적으로 가능한 범위까지는 최적의 실내공기의 질(IAQ)을 확보하도록 한다. 특히, 접

착제, 기밀재, 광택재, 충전재, 페인트 등의 액체성 재료는 가능한 적게 사용되어야 하며, 설계자 및 시공자는 사용량을 최소화하기 위한 방안을 제시하여 건축주의 사전 승인을 얻도록 한다. 또한, 카펫, 흡음재, 직물류 등의 마감재들은 사용된 액체성 재료가 완전히 건조된 후에 설치되어야 하고, 모든 건조한 상태의 가구재나 마감재는 가능하면 건물 내에 설치하기 이전에 외기에 충분히 노출시켜야 한다.

넷째, 발생한 오염원의 확산을 억제하기 위하여 효과적인 환기를 실시하여야 한다. 환기의 방법으로는 적절한 개구부의 설치를 통한 자연환기가 효과적이지만, 이와함께 기계환기장치를 도입하여 지속적인 환기가 가능하도록 하며, 이 때 도입되는 외부공기의 오염상태를 고려하여 공기정화장치의 설치도 고려하여야 한다.

후 기

이 논문은 1993년도 한국학술진흥재단의 대학부설연구소 연구과제 연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. 김신도 외. 1993, 대기오염 개론, 서울: 동화기술
2. 이연구, 이병담, 박진철. 1994, 신축공동주택의 실내 공기환경에 관한 연구. 대한건축학회 춘계학술발표논문집, 제14권 제1호, pp. 311~316.
3. 이연구, 박진철, 이상형. 1994, 신축공동주택의 라돈농도 특성에 관한 연구. 대한건축학회 춘계학술발표논문집, 제14권 제2호, pp. 349~354.
4. 이연구, 박진철, 이상형. 1995. 기존공동주택의 실내공기환경에 관한 측정연구. 대한건축학회 춘계학술발표논문집, 제15권 제1호, pp. 331~336.
5. 이연구, 박진철, 이상형. 1995. 공동주택의 실내공기환경에 관한 측정연구. 공기조화냉동공학회 동계학술발표논문집, 95-W-066, pp.

- 423~428.
6. 한국과학재단. 1991. 실내의 공기질의 유해평가 관리 및 기준치 개발에 관한 연구.
 7. Awbi, H. B. 1991, Ventilation of Buildings; ventilation requirements. First edition, London: E & FN SPON.
 8. Burgess, W. A., Ellenbecker, M. J., Treitman, R. D. 1989, Ventilation for Control of the Work Environment; Equations for General Exhaust Ventilation. New York: A Wiley-Interscience Publication.
 9. Hines, A. L., et al. 1993. Indoor AIR Quality and Control. New Jersey: PTR Prentice Hall.
 10. Indoor Air '93. 1993, Proceedings of the 6th International Conference on Indoor Air Quality and Climate. Helsinki, Finland: Proceedings of Indoor Air '93, Vol. 1~6.
 11. RIEMAM, E. K. Rhee, et al., 1995, Proceedings of The 5th International Symposium on Building and Urban Environmental Engineering and Management, Kumamoto, Japan, pp. 13~19.
 12. Samet, J. M. and Spengler, J. D. 1991, Indoor air pollution: a health perspective. London: The Jones Hopkins Press.