

신축공동주택 미규제 오염물질 특성평가

정정화*, 조영성, 전남수, 조영민, 길혜진, 이범열, 강희규, 방기인, 이성모
인천광역시보건환경연구원 생활환경과

Assessment of unregulated indoor air pollutants in newly built apartment

Jung-Hwa Jung*, Yeong-Seong Jo, Nam-Soo Jun, Young-Min Cho, Hye-Jin Kil,
Boem-Yeol Lee, Hee-Gyu Kang, Ki-In Bang, Sung-Mo Lee

Division of Indoor Environment , Incheon Metropolitan City Institute of Public Health
and Environment

ABSTRACT

This study was conducted to investigate unregulated indoor air pollutants from 109 newly built apartments in Incheon. We monitored carbonyl compound and VOCs in unregulated indoor air pollutants and assessed exposure, toxicity, hazard and regulatory of pollutants using CRS(chemical ranking system). Also, we selected pollutants to preferentially manage from CRS score, ECR, HQ etc. The highest thing of unregulated pollutants was Butyraldehyde, the other substances were Acetone > n-Butanol > n-Butylacetate > Acetaldehyde > Methyl Isobutyl Ketone > n-Tridecane > n-Nonane > Nonanal > Decanal. The management substances among unregulated pollutants evaluated by detected amount were Butyraldehyde, Acetone, Acetaldehyde, n-Butylacetate. The priority management substances assessed by CRS were Acetaldehyde, Trichlorethylene, 1,2-dichloroethane. Acetaldehyde and 1,2-dichloroethane need to be considered as new regulatory substance, but trichlorethylene require more data collection through continuous monitoring for gaining reliable data. Through this research project, we obtained basic data for the study of unregulated air pollutants from newly built apartment and it can be used as policy data.

Key words : Newly built apartment, Indoor air pollutants, Unregulated pollutants, CRS, VOCs, Carbonyl compound, Risk assessment.

I. 서론

현대인들이 실내에서 생활하는 시간은 하루 중 90 %이상으로 일생의 대부분을 실내환경 속에서 생활하고 있음에도 실내 공기 오염에 대한 관심이 미세먼지, 황사 등과 같은 실외 환경 오염보다 부족하다.

실내공기오염은 주택, 학교, 사무실, 공공건물, 병원, 지하시설물, 교통수단 등의 다양한 실내 공간에서 매우 복합적인 원인들에 의해서 야기되며 그 영향이 실내 거주자들의 생명을 위협할 정도로 치명적이지는 않다. 하지만 저농도의 오염물질에 장시간 노출되기 때문에 장기적인 측면에서는 매우 중요한 의미를 지닌다.

세계보건기구(WHO)에 따르면 실내공기오염 물질이 실외오염물질보다 폐에 전달될 확률이 1000배나 높다고 추정하였고 미국환경보호청(EPA)에서도 실내공기 오염의 심각성과 인체 위해성에 대한 사람들의 무관심을 경고하며, 실내 공기 오염을 가장 시급히 처리해야 할 환경문제 중 하나로 꼽았다.

특히 신축공동주택의 경우 입주 초기 실내 내장재 및 마감재 등에서 발생하는 미지의 다양한 오염물질에 노출되므로 인체에 더욱 유해한 영향을 미칠 수 있다.

『실내공기질관리법』 시행 이후 신축공동주택의 오염물질은 크게 감소하였으나 규제가 일부 물질에만 한정되어 있어 기존 규제물질이 포함되어 있는 많은 대체물질의 사용이 상대적으로 증가하면서 신규 오염물질에 대한 우려가 높아지고 있다. 또한 기존 연구도 대부분 규제 물질에만 국한되어 있어 미규제 물질에 대한 자료가 매우 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 인천 지역의 신축공동주택을 대상으로 실내공간에서 카보닐화합물과 휘발성유기화합물의 오염도 조사를 통해 검출량을 기반으로 한 실내오염도 실태를

파악하고, 화학물질 우선선정 기법인 CRS (chemical ranking system)기법을 이용하여 각 오염물질의 노출도, 독성도, 위해도, 규제 여부 등을 평가한 후 신축공동주택에서 검출되는 미규제 물질 중 우선관리 대상물질을 제안함으로써 국내 신축공동주택의 실내공기 오염 연구를 위한 기초자료 활용 및 향후 정책 추진을 위한 과학적 기반을 마련하고자 한다.

II. 이론적 고찰

2.1. 국내 실내공기질 관리현황

국내 실내 공기질 관리는 2003년에 “다중이용 시설 등의 실내공기질관리법” 제정으로 제도적 기틀을 마련하였으며, 관리대상 시설 확대, 실내 공기질 기준 설정, 환기 설비 설치 의무화, 오염 물질 방출 건축자재 사용 제한 등 다양한 정책이 도입되었고, 2004년 실내공기질 관리 기본계획 수립 및 실내 환경 개선 협의회 구성으로 실내 공기질 관리체계가 구축되었다. 2009년에는 실내 공기질 관리를 위한 5개년(2009~2013) 중·장기 종합계획을 관계부처(환경부, 교육과학부, 지식경제부, 보건복지가족부, 노동부, 국토해양부) 합동으로 수립한 바 있다.¹⁾

현재 『실내공기질관리법』에 따라 다중이용 시설의 실내공기질은 법적 규제기준인 유지기준과 권고기준으로 구분하여 시설별, 대상물질별로 기준을 설정하여 관리하고 있다. 유지기준 관리 대상물질은 미세먼지(PM₁₀), 이산화탄소(CO₂), 폼알데하이드(HCHO), 총부유세균, 일산화탄소(CO)이며, 권고기준 관리 대상물질은 이산화질소(NO₂), 라돈(Rn), 총휘발성유기화합물(TVOC), 미세먼지(PM_{2.5}), 곰팡이다. 2019년 7월 1일 이후에는 미세먼지(PM_{2.5})가 권고기준에서 유지기준으로 변경될 예정이다.

또한 다중이용시설 외에 신축공동주택에 대한 실내공기질 기준도 권고하고 있다. 이는 “새집

증후군”으로 문제되고 있는 신축공동주택의 실내공기질을 관리하기 위한 것으로, 현재 사업 계획의 승인 또는 건축허가를 신청한 100세대 이상인 아파트, 연립 주택, 기숙사의 사업자는 입주전 실내공기질 검사를 시행하여 그 결과를 입주민에게 공고하도록 하고 있다. 신축공동주택의 관리물질과 권고기준은 (Table 1.)과 같다. 라돈의 경우 2019년 7월 1일 이후 기준이 더 강화될 예정(200→148 Bq/m³)이다.

Table 1. Guideline for pollutant concentratrtaion level of new aptmnet in Korea

Compound	Guideline
Formaldehyde	210 µg/m ³
Benzene	30 µg/m ³
Toluene	1,000 µg/m ³
Ethylbenzene	360 µg/m ³
Xylene	700 µg/m ³
Styrene	300 µg/m ³
Rn	200(148) Bq/m ³

2.2. 국가별 실내공기질 관리현황¹⁾

(Table 2.)는 우리나라와 각국의 실내공기질 관리 현황으로 국가별 실내공기질 법적효력과 관리 항목을 나타낸 것이다.

우리나라는 환경부의 『실내공기질관리법』을 바탕으로 실내공기질 평가에만 초점을 맞춘 반면, WHO는 대기와 실내에서 모두 적용할 수 있는 기준을 제시하고 있고 노르웨이는 가이드라인을 근거로 실내공기질 개선을 요청하거나 건물을 폐쇄시킬 수 있는 등의 기능을 갖추고 있다.

독일은 일평생 노출되더라도 전혀 건강상의 위해를 초래하지 않는다고 판단하는 RWI와 화학 물질에 특히 민감한 사람 기준인 RWII로 구분하여 관리하고 있지만 엄격히 금지된 환경부담의 한계를 설정한 법규적 효력을 갖는 기준은 아니다.

캐나다는 권고항목에 대해 장단기로 기준이 설정되어 있다. 장기 노출 기준은 장기간(days, weeks, month 등)에 걸쳐 지속적 또는 반복적으로

노출되는 건강 문제들을 관리할 수 있도록 제시한 기준이고, 단기 노출 기준은 페인트나 접착제와 같은 가정용 제품 등의 작업을 할 때 높은 수준의 단기 노출(hours)로부터 즉시 발생할 수 있는 건강 문제들을 관리할 수 있도록 제시한 기준이다. 이러한 권고기준은 법적 효력은 없지만 실내공기 오염으로부터의 위험을 저감하기 위한 과학적인 근거로 제공된다.

미국에서는 오염물질별 법적규제는 하지 않고 있으나 다양한 실내공간에 대한 관리를 위해 작업장 환경에서의 실내오염물질에 대한 가이드 라인을 제시하고 있다. 대신 EPA에서는 곰팡이, 라돈, 폼알데하이드 그리고 다른 실내공기질 문제들에 대한 정보를 제공함으로써 실내공기질을 보호하는 데 도움을 준다.

싱가포르는 실내공기질의 경우 매 2년마다, 환기시스템의 경우 매 6개월마다 건물 소유자가 정밀검사토록 의무화하고 있다.

일본은 관련 법령과 관련 부처가 분산되어 있고 특정건축물에 대하여 오염물질별로 구속력 있는 기준을 정하고 있다는 점에서 우리나라와 유사하다. 후생노동성에서는 주택을 대상으로 연차적으로 권고기준을 설정하여 관리하고 있는 반면, 문화과학성에서는 아동, 학생 및 직원의 건강을 보호하기 위해 법적 강제성이 있는 기준으로 관리하고 있다.

핀란드에서는 다양한 수준에서 FiSIAQ 실내 공기질 인증제도, IAQ 라벨링 제도 등의 실내 공기질 개선 활동이 이루어지고 있다.

홍콩에서는 2단계의 IAQ 기준 (Excellent Class, Good Class)을 달성하기 위하여 실내 공기질을 평가하고 인증하는 프로그램을 자율적으로 운영하고 있다. IAQ 기준은 매우 양호 (Excellent Class)와 양호(Good Class)로 구분하여 Excellent Class는 편안하고 높은 수준의 건물이 가져야 하는 훌륭한 IAQ 기준을 나타내고 Good Class는 연령이 어리거나 높은 사람을 포함하는 일반 대중에 대한 보호를 제공하는 IAQ 기준을 나타낸다.

Table 2. Legal force and indoor air pollutants by restricted by each contry

Country	Legal force	Pollutant
Korea	R*	PM ₁₀ , CO ₂ , HCHO, TBC, CO
	G**	NO ₂ , Rn, TVOC, PM _{2.5} , Mold
		HCHO, BTEX, Styrene
WHO	G	PM ₁₀ , HCHO, CO, NO ₂ , Rn, BTX, Styrene, TCE, PCE, Naphthalene, PAHs, PM _{2.5}
Norway	G	CO ₂ , HCHO, CO, NO ₂ , Rn, TVOC, ASB(Asbestos), O ₃ , Benzene, PM _{2.5} , Mold, House dust mite, Animal allergen, Legionella, Synthetic mineral fiber, Humidity, Second-hand smoking, Noise
Germany	G	<ul style="list-style-type: none"> - Guideline II (RW II) : CO, NO₂, Toluene, Ethyl-benzene, Styrene, Aldehydes, Acetaldehyde, Naphthalene, 2-Ethylhexanol, Cresols, Phenol, 2-Furaldehyde, Diisocyanates (DI), Benzaldehyde, Benzyl alcohol, Mercury etc. (40) - Guideline I (RW I) : the same things except for NO₂ (39)
Canada	G	HCHO, CO, NO ₂ , O ₃ , Benzene, Toluene, Naphthalene, PM _{2.5} , Mold
U.S.A	G	PM ₁₀ , CO ₂ , HCHO, CO, NO ₂ , Rn, O ₃ , SO ₂ , PM _{2.5}
Singapore	G	CO ₂ , HCHO, TBC, CO, VOCs, O ₃ , Suspended Particles, TFC, Temperature, Relative humidity, Air current
Japan	R	HCHO, Toluene, TVOC etc. (14)
	G	CO ₂ , Suspended Particles etc. (14)
Finland	G	PM ₁₀ , HCHO, CO, Rn, ASB, NH ₃ , Amine, Styrene,
Hong Kong	G	<ul style="list-style-type: none"> - Excellent Class : PM₁₀, CO₂, HCHO, TBC, CO, NO₂, Rn, TVOC, O₃, Temperature, Relative humidity, Air current - Good Class : Carbon tetrachloride, Chloroform, Ethylbenzene, 1,2-Dichlorobenzene, 1,4-Dichlorobenzene, Tetrachloroethylene, Toluene, Xylene, Benzene, Trichloroethylene

*R : Restriction, **G : Guideline

2.3. 실내공기질 오염물질의 특성

신축공동주택에서 검출되는 오염물질의 물리적 특성과 발암위해성은 (Table 3.)과 같으며 카보닐 화합물과 8군의 휘발성유기화합물로 분류하여 나타내었다. 이 중 발암물질은 Benzene, Formaldehyde, Acetaldehyde, Chloroform, 1,2-dichloroethane, 1,2-dichloropropane, Bromodichloromethane, Tri-chloroethylene, Tetrachloroethylene, 1,4-dichloro-benzene으로 조사되었다.

Table 3. Physical characteristics and carcinogenicity of indoor air pollutants

Compound	M.W	B.P (°C)	V.D	Carcinogenicity
Carbonyl				
Formaldehyde	30.0	-19.5	1.00	○
Acetaldehyde	44.1	20.0	1.52	○
Acrolein	56.1	53.0	1.94	-
Acetone	58.1	56.2	2.0	-
Propionaldehyde	58.1	46-50	2.0	-
Butyraldehyde	72.1	75	2.5	-
Benzaldehyde	106.1	179	3.6	-
Aromatic Hydrocarbon				
Benzene	78.1	80	-	○
Toluene	92.2	110.6	3.2	-
Ethylbenzene	106.2	136	3.7	-
m,p,o-Xylene	106.2	138	3.7	-
Styrene	104.2	145-146	3.6	-
1,2,4,5-tetra-methylbenzene	134.2	191-197	-	-
m-Ethyltoluene	120.2	158-159	-	-
p-Ethyltoluene	120.2	162	-	-
o-Ethyltoluene	120.2	164-165	-	-
1,3,5-trimethyl-benzene	120.2	162-164	4.2	-
1,2,3-trimethyl-benzene	120.2	175-176	-	-
1,2,4-trimethyl-benzene	120.2	168	-	-

Table 3. Physical characteristics and carcinogenicity of indoor air pollutants (continue)

Compound	M.W	B.P (°C)	V.D	Carcinogenicity
Aliphatic Hydrocarbon				
2,4-dimethyl-pentane	100.2	80	-	-
2,2,4-trimethyl-pentane(Isooctane)	114.2	98~99	3.9	-
n-Hexadecane	226.5	287	7.8	-
n-Pentadecane	212.4	271	7.4	-
n-Octane	114.2	118	-	-
n-Undecane	156.3	196	5.4	-
n-Tetradecane	198.4	254	6.9	-
n-Heptane	100.2	98	3.5	-
Hexane	86.2	69	3.0	-
n-Dodecane	170.4	216.2	5.9	-
n-Decane	142.3	174	4.9	-
n-Nonane	128.3	151	4.4	-
n-Tridecane	184.4	235	6.4	-
Halogenated Hydrocarbon				
Chloroform	119.4	61	4.1	○
1,2-dichloroethane	99.0	83	3.4	○
1,2-dichloropropane	113.0	95~96	-	○
Bromodichloro-methane	163.8	90	-	○
Trichloroethylene	131.4	86.7	4.5	○
Dibromochloro-methane	208.3	119~120	-	-
Tetrachloroethylene	165.8	121	5.8	○
1,4-dichlorobenzene	147.0	173	5.1	○
Terpen				
D-Limonene	136.2	178	-	-
Beta-Pinene	136.2	158~166	-	-
Alpha-Pinene	136.3	156	-	-
Ketone				
Methyl Isobutyl Ketone	100.2	117	3.5	○
Acetate				
n-Butyl acetate	116.2	124~126	4.0	-
Alcohol				
n-Butanol	84.2	64	2.6	-
Aldehyde				
Decanal	156.3	207~209	-	-
Nonanal	142.3	190	-	-

*M.W: Molecular formula, B.P: Boil point, V.D: Vapor density

III. 조사대상 및 방법

3.1. 조사 대상

본 연구에서 조사대상은 2018년 인천시 신축 공동주택 수요조사를 통해 (Fig. 1)과 (Table 4.)에 나타난 바와 같이 관내 구군별 100세대 이상 규모의 신축공동주택 중 3월~11월에 준공되는 공동주택을 대상으로 총 109세대를 선정하여 조사를 실시하였다.

Table 4. The status of target new apartment in 2018.

Region	No.	Name	Type	The number of household	
				Total	Target
Yeonsu-gu	3	Y-1	Apt	2,610	20
		Y-2		830	10
		Y-3		668	18
Sea-gu	5	S-1		686	8
		S-2		380	5
		S-3		1,598	17
		S-4		1,163	13
		S-5		674	18
Total				8,609	109

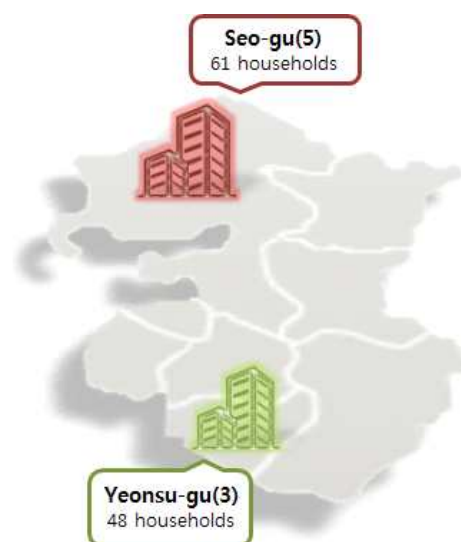


Fig. 1. Location of target new APT in Incheon.

3.2. 조사 방법

3.2.1. 분석항목

본 연구에서는 “신축공동주택 미규제 오염물질 조사 방법”에 따라 휘발성유기화합물 42종과 카보닐화합물 7종 총 49종의 오염물질을 분석항목으로 선정하였다.(Table 5.)

Table 5. Target compounds in this study.

Type	No.	Compound
VOCs	42	Hexane, Chloroform, 1,2-dichloroethane, 2,4-dimethylpentane, n-Butanol, Benzene, 1,2-dichloropropane, Bromodichloromethane, Trichloroethylene, Isooctane, n-Heptane, Methyl Isobutyl Ketone, Toluene, Dibromochloromethane, Butyl acetate, n-Octane, Tetrachloroethylene, Ethylbenzene, m-Xylene, p-Xylene, Styrene, n-Nonane, α -Pinene, m-Ethyltoluene, p-Ethyltoluene, 1,2,3-trimethylbenzene, o-Ethyltoluene, β -Pinene, 1,2,4-trimethylbenzene, n-Decane, 1,4-dichlorobenzene, 1,3,5-trimethylbenzene, D-Limonene, Nonanal, n-Undecane, 1,2,4,5-tetramethylbenzene, Decanal, n-Dodecane, n-Tridecane, n-Tetradecane, n-Pentadecane, n-Hexadecane
Carbonyl	7	Formaldehyde, Acetaldehyde, Acrolein, Acetone, Propionaldehyde, Butyraldehyde, Benzaldehyde

3.2.2. 시료채취 및 분석 방법

시료채취 및 분석 방법은 『실내공기질관리법』에서 규정하고 있는 실내공기질 공정시험방법에 준하였다.

(1) 시료채취

(Fig. 2.)과 같이 시료 채취 전 외부에 면한 모든 개구부(창호, 출입문, 환기구 등)와 실내 출입문, 수납가구의 문 등을 개방하고 30분이상 환기시킨 후 외부공기와 면하는 개구를 5시간 이상 모두 닫아 실내외 공기의 이동을 차단하였고, 실내간의 이동을 위한 문과 수납가구 등의 문은 개방하여 실시하였다.

시료채취는 30분간 2회 실시하였고, 실내에 자연환기 및 기계 환기설비가 설치되어 있을 경우, 이를 밀폐하거나 가동을 중단하여 실시하였다. 또한 위치는 거실과 침실의 중앙 점에서 바닥으로부터 1.2~1.5 m 높이에서 채취하였다.



Fig. 2. Sampling method.

(2) 분석 방법

휘발성유기화합물은 MP-Σ30H (Sibata, JP) 펌프를 이용하여 Tenax tube(Markes, UK)에 100 mL/min의 유량으로 30분 동안 각 측정 장소의 중앙 지점에서 포집한 후 자동열탈착장치(Unity-xr, Markes, UK)가 부착된 GC/MS(Thermo Trace1310/Thermo ISQLT, U.S.A)를 이용하여 분석하였다.

포름알데히드의 경우 MP-Σ100H (Sibata, JP) 펌프에 오존스크리버 (Supelco, U.S.A)를 부착한 후 2,4-DNPH 카트리지 (Supelco, U.S.A)를 연결하여 500 mL/min의 유량으로 30분간 측정하여 HPLC(M2695, WATERS, US)로 분석하였다.

3.2.3. 우선관리 대상물질 선정 방법¹⁾

본 연구에서는 신축공동주택에서 검출되는 미규제 물질 중 우선관리 대상물질을 도출하기 위하여 화학물질에 대한 우선순위 선정기법인 CRS(chemical ranking system)기법을 이용하였다.

CRS 기법은 화학물질의 위험성과 노출 정도를 바탕으로 인체에 위해가 되는 정도를 설정하고 이를 지표로 하여 우선순위를 도출하는 방법이다. 일반적으로 목적 및 범위를 설정하고 기반이 되는 자료를 이용하여 화학물질의 순위 및 점수를 산정하여 우선순위를 도출하는 과정으로 구성된다.

(Fig. 3.)과 (Table 6.)은 선행연구에서의 실내 오염물질에 대한 우선순위 도출을 위한 CRS 기법의 주요 인자 구성과 세부 배점표로 이를 활용하여 우선관리 대상 물질을 선정하였다.

CRS의 주요인자는 실내공기질 오염실태에 관한 정보, 인체 영향에 대한 정보, 위해성 평가를 통해 산정된 물질별 위해도 정보, 국내외 규제정보로 구성된다.

실내공기질 정보와 관련된 노출점수는 오염물질의 검출률, 평균농도, 최대값, 국내 권고 수준에 따른 초과율 등으로 산정되고 총 100점 중 30점의 비중을 차지한다.

인체 영향에 대한 독성점수는 각 물질의 흡입 발암 등급 및 단위위해도, 흡입 독성 등급 및 흡입 참고 농도, GHS의 생식독성 및 생식세포 변이원성, 흡입 및 피부 과민성 등에 대한 정보로 산정되며 전체 중 30점이 배점된다.

오염물질별 위해도 점수는 위해성 평가를 통해 산출된 초과발암위험도 및 독성위험값 범위에 따라 점수가 부여되며 전체 중 20점을 차지하고 나머지 20점의 경우 국내외 규제정보에 따른 점수로 배분된다.

본 연구에서 노출점수와 위해점수는 실측 자료를 이용하여 산출하였고 독성점수와 규제 점수는 선행연구에서 산출한 값을 참고하였다.

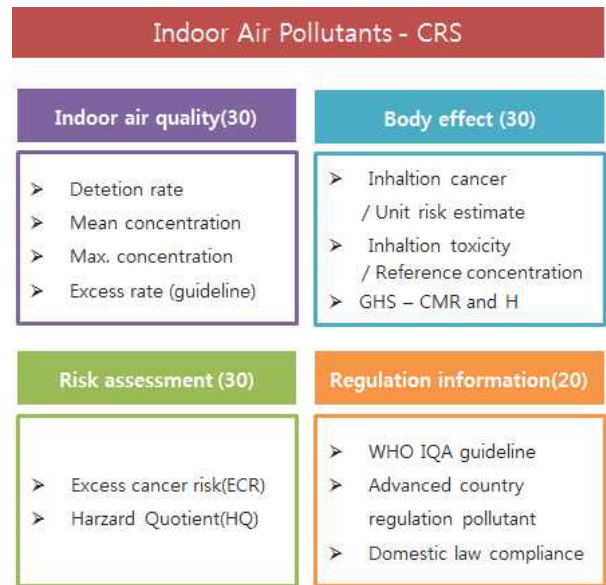


Fig. 3. Major factor of CRS

Table 6. Evaluation Criteria for CRS

Factor		Score					
		10	7	5	3	1	0
E	Detection rate	≥90	75≤ x<90	50≤ x<75	25≤ x<50	0< x<25	0
	Dispersion	≥100	10≤ x<100	1< x<10	-	-	0
	Excess rate	≥20	10≤ x<20	0≤ x<10	-	-	0
T	Carcinogenicity	GHS 1,2	-	-	-	-	×
	Muta-genicity	GHS 1,2	-	-	-	-	×
	Reproductive toxicity						
	Hypersensitive-ness	GHS 1,2	-	-	-	-	×
H	ECR	≥1e ⁻⁶	-	0< x<1e ⁻⁶	-	-	0
	HQ	≥0.1	0.01≤ x<0.1	0< x<0.01	-	-	0
R	Restricted countries	≥2	-	1	-	-	×
	Domestic law	○					×

※E: Exposure, T: Toxicity, H: Hazard, R: Regulation

CRS을 통한 실내오염물질의 우선순위 선정은 오염물질별 세부 배점을 이용하여 총 점수를 산정한 후 (Table 7.)의 조건에 따라 우선관리 대상물질을 1~3 순위로 구분하여 선정하였다.

Table 7. Condition for grade

Grade	Condition
1	Total score of CRS ≥ 50
2	Total score of CRS < 50 , ECR $\geq 1 \times 10^{-6}$ or HQ ≥ 0.1
3	Harzard score > 0 , Detection rate ≥ 40

IV. 결과 및 고찰

4.1. 실내공기질 오염물질 분포 특성

신축공동주택에서 검출된 전체 오염물질의 분포 특성을 알아보기 위해 각 물질의 평균값을 산정하고, 전체 물질의 합산된 평균값과 비교하여 물질별 구성비율을 산출하였다.

또한 전체 오염물질을 화학적 특성 (휘발성유기 화합물의 8군, 카보닐화합물)과 발암 여부에 따라 발생하는 비율을 산정하여 비교하였다.

전체 오염물질 중 가장 높게 검출된 물질은 (Fig. 4.)와 같이 Toluene으로 36.0 %를 차지했고 Butyraldehyde 17.0 %, m,p,o-Xylene 7.8 %, Ethylbenzene 7.2 %, Acetone 6.4 %, n-Butanol 4.9 %, Formaldehyde 2.8 %, Styrene 2.3 %, n-Butylacetate 2.1 %, Acetaldehyde 1.8 %, Methyl Isobutyl Ketone 1.6 % 순으로 나타났다.

이 중 규제물질(m,p,o-Xylene, Ethylbenzene

Styrene, Formaldehyde)보다 높게 나온 물질은 Butyraldehyde, Acetone, n-Butanol로 나타났다.

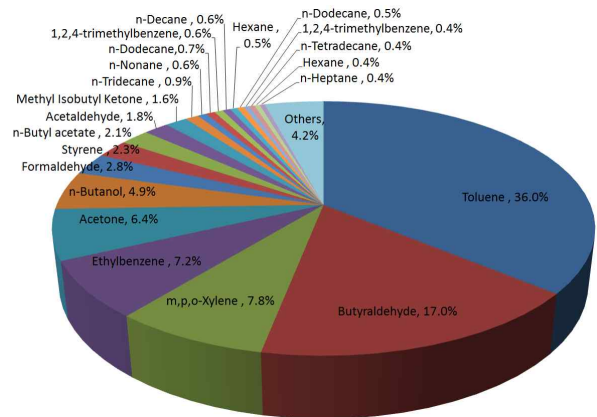


Fig. 4. Portion of total indoor air pollutants detected from new APT in Incheon.

(Fig. 5.)와 (Table 8.)는 전체 중 규제물질인 BTEX, Styrene, Formaldehyde를 제외한 오염물질의 발생비율을 산정한 결과를 나타낸 것으로 Butyraldehyde이 39.06 %로 가장 높게 나타났고 Acetone 14.69 %, n-Butanol 11.19 %, n-Butylacetate 4.75 %, Acetaldehyde 4.03 %, Methyl Isobutyl Ketone 3.63 %, n-Tridecane 2.16 %, n-Nonane 1.47 %, Nonanal 1.45 %, Decanal 1.42 % 순으로 나타났다.

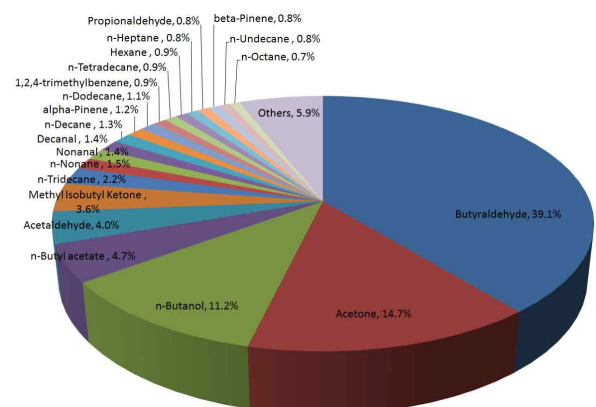


Fig. 5. Portion of unregulatory indoor air pollutants detected from new APT in Incheon.

Table 8. Average concentration and portion of unregulatory pollutants in new APT

Compounds	Average concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Portion (%)
Butyraldehyde	145.89	39.06
Acetone	54.84	14.69
n-Butanol	41.79	11.19
n-Butylacetate	17.72	4.75
Acetaldehyde	15.03	4.03
Methyl Isobutyl Ketone	13.54	3.63
n-Tridecane	8.05	2.16
n-Nonane	5.49	1.47
Nonanal	5.41	1.45
Decanal	5.30	1.42
n-Decane	4.83	1.29
Alpha-Pinene	4.35	1.16
n-Dodecane	4.26	1.14
1,2,4-trimethylbenzene	3.39	0.91
n-Tetradecane	3.32	0.89
Hexane	3.19	0.85
n-Heptane	3.13	0.84
Propionaldehyde	3.13	0.84
Beta-Pinene	3.08	0.83
n-Undecane	2.86	0.76
n-Octane	2.68	0.72
Others	22.16	5.93

화학적 특성에 따른 오염도를 알아보기 위해 카보닐화합물과 휘발성유기화합물인 방향족탄화수소, 지방족탄화수소, 할로젠화탄화수소, 알데하이드류, 알콜류, 케톤류로 분류하여 (Fig. 6.)-(Fig. 7.)과 같이 검출비를 산정하였다.

카보닐화합물은 Butyraldehyde 59.4 %, Acetone 22.3 %, Formaldehyde 9.7 %, Acetaldehyde 6.4 % 순으로 나타났다. 이 중 Butyraldehyde와 Acetone은 규제 물질인 Formaldehyde보다 높게 검출되었다.

방향족탄화수소의 경우 Toluene 66 %, m,p,o-Xylene 14.3 %, Ethylbenzene 13.2 %, Styrene 4.3 %, 1,2,4-trimethylbenzene 0.7 %, Benzene 0.4 % 순으로 나타났다.

이 중 높은 비율을 차지한 BTEX, Styrene은 이미 실내공기질 오염물질로 관리되고 있으나 1,2,4-trimethylbenzene의 경우 규제 물질인 Benzene보다 높게 나타났음에도 관리되고 있지 않다.

지방족탄화수소는 n-Tridecane이 18.4 %로 가장 높게 나타났으며, n-Nonane 12.6 %, n-Decane 11.1 %, n-Dodecane 9.7 %, Hexane 7.3 % 등 순으로 나타났다. 물질별 비율이 1.9~18.4 %으로 전반적으로 큰 편차를 보이지 않고 비슷한 수준으로 검출되었다.

주로 발암물질로 알려진 할로젠화탄화수소는 Trichloroethylene 28.8 %, 1,4-dichlorobenzene 21.8 %, 1,2-dichloroethane 19.6 %, Chloroform 14.4 %, 1,2-trichloropropane 12.8 % 순으로 나타났고 그 외 물질은 2.6 %로 매우 낮은 수준으로 검출되었다.

Aldehyde는 Nonanal 50.5 %, Decanal 49.5 % 순으로 Terpen은 Alpha-pinene 49.0 %, Beta-pinene 34.7 %, D-Limonene 16.3 %로 나타났다.

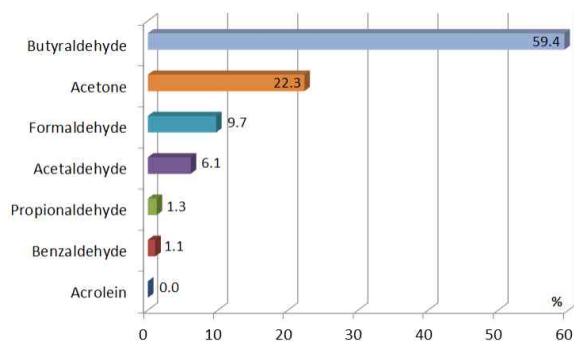


Fig. 6. Portion of carbonyl detected from new APT in Incheon

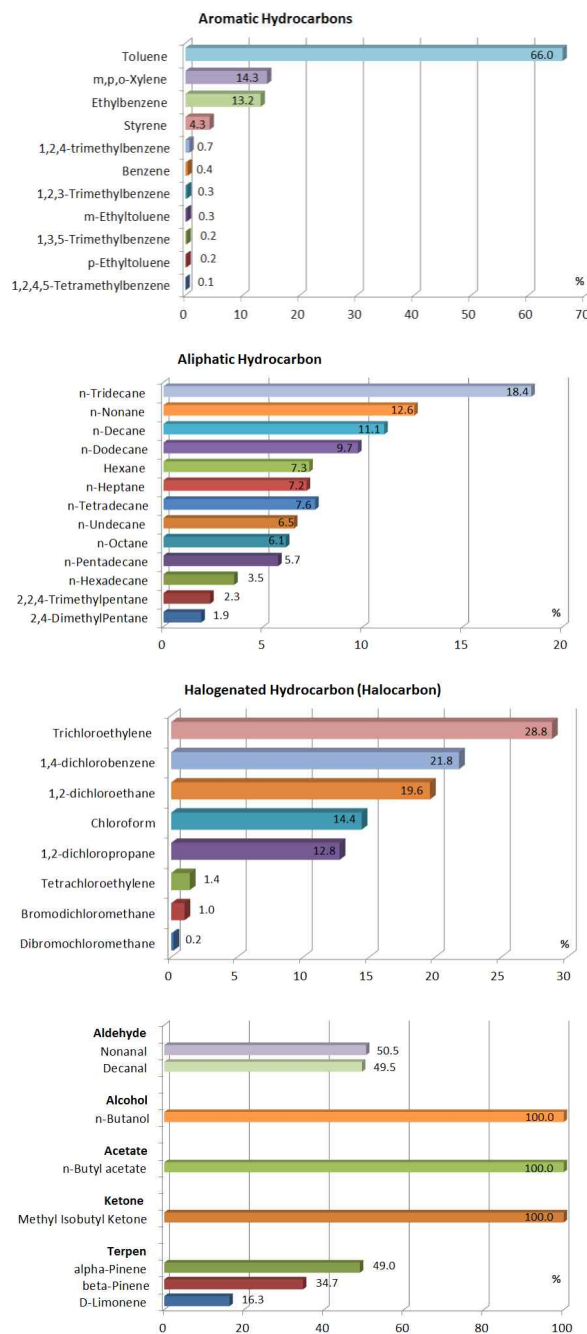


Fig. 7. Portion of VOCs detected from new APT in Incheon.

(Table 9.)은 각 그룹별 검출량이 상위에 있는 오염물질들을 나타낸 것으로 이 규제물질인 Toluene, m,p,o-Xylene, Ethylbenzene, Benzene, Styrene, Formaldehyde는 제외하였다.

Table 9. High ranking pollutants detected from new APT by group

Group	Compound
Carbonyl	Butyraldehyde
	Acetone
Aromatic Hydrocarbon	1,2,4- Trimethybenzene
Aliphatic Hydrocarbon	n-Tridecane
	n-Nonane
	n-Decane
Halogenated Hydrocarbon	Trichloroethylene
	1,4-dichlorobenzene
	1,2-dichloroethane
Aldehyde	Nonanal
	Decanal
Alcohol	n-Butanol
Acetate	n-Butylacetate
Ketone	Methyl Isobutyl Ketone
Terpen	Alpha-Pinene

전체 신축공동주택에서 검출된 오염물질을 비발암물질과 발암물질을 선별하여 구성비를 산정한 결과 비발암물질은 (Fig. 8.)과 (Table 10.)에서 보는 바와 같이 Toluene이 38.1 %로 가장 높았으며, Butyraldehyde 18.0 %, m,p,o-Xylene 8.3 %, Acetone 6.8 %, n-Butanol 5.2 %, Styrene 2.5 %, n-Butylacetate 2.2 % 순으로 나타났다. 규제 물질을 제외한 항목 중에는 Butyraldehyde가 가장 높게 나타났으며, Acetone, n-Butanol, n-Butylacetate순으로 나타났다.

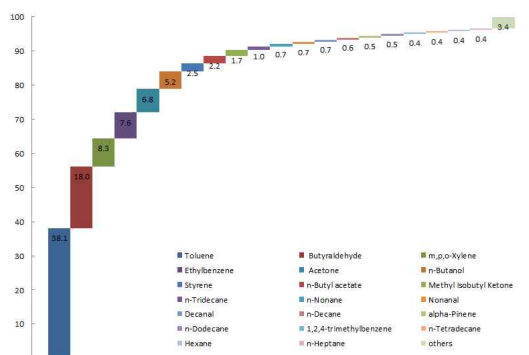


Fig. 8. Portion of noncarcinogens detected from new APT in Incheon.

Table 10. Average concentration and portion of noncarcinogens detected from new APT

Compound	Average concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Portion (%)
Toluene	308.56	38.1
Butyraldehyde	145.89	18.0
m,p,o-Xylene	66.88	8.3
Ethylbenzene	61.55	7.6
Acetone	54.84	6.8
n-Butanol	41.79	5.2
Styrene	19.90	2.5
n-Butylacetate	17.72	2.2
Methyl Isobutyl Ketone	13.54	1.7
n-Tridecane	8.05	1.0
n-Nonane	5.49	0.7
Nonanal	5.41	0.7
Decanal	5.30	0.7
n-Decane	4.83	0.6
Alpha-Pinene	4.35	0.5
n-Dodecane	4.26	0.5
1,2,4-trimethylbenzene	3.39	0.4
n-Tetradecane	3.32	0.4
Hexane	3.19	0.4
n-Heptane	3.13	0.4
Others	27.50	3.4

발암물질의 경우 (Fig. 9.)와 (Table 11.)과 같이 전체 중 Formaldehyde가 50.49 %로 가장 높게 나타났으며, Acetaldehyde가 31.73 %, Benzene 4.26 %, Trichloroethylene 3.90 %, 1,4-dichloro-benzene 2.95 %, 1,2-dichloroethane 2.65 % 순으로 나타났다. 규제물질인 Formaldehyde와 Benzene을 제외하면 발암물질 중에는 Acetaldehyde가 가장 높았고 Trichloroethylene, 1,4-dichlorobenzene, 1,2-dichloroethane 순으로 나타났다.

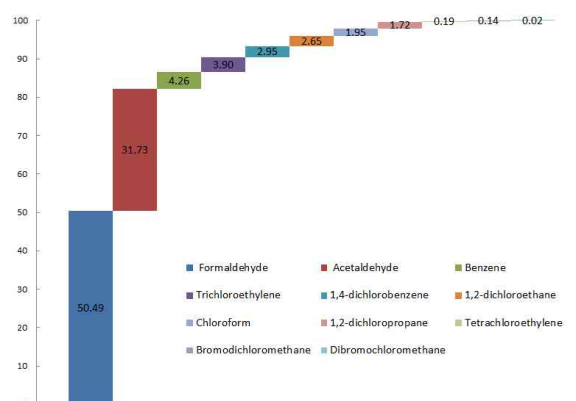


Fig. 9. Portion of carcinogens detected from new APT in Incheon.

Table 11. Average concentration and portion of noncarcinogens detected from new APT

Compound	Average concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Portion (%)
Formaldehyde	23.92	50.49
Acetaldehyde	15.03	31.73
Benzene	2.02	4.26
Trichloroethylene	1.85	3.90
1,4-dichlorobenzene	1.40	2.95
1,2-dichloroethane	1.25	2.65
Chloroform	0.92	1.95
1,2-dichloropropane	0.82	1.72
Tetrachloroethylene	0.09	0.19
Bromodichloro-methane	0.06	0.14
Dibromochloro-methane	0.01	0.02

4.2. CRS(Chemical ranking system)에 의한 우선관리 대상물질 선정

4.2.1. CRS에 의한 주요인자별 점수 산정

실내 오염물질 중 우선관리 대상 물질을 선정하기 위해 앞서 3.2.3에서 언급한 CRS기법을 이용하여 주요인자를 노출, 독성, 위해, 규제로 구분하여 점수화하였다.

노출점수는 각 물질의 검출률, 분산률, 초과률을 산출하여 산정하였고 독성점수는 국제 독성 등급을 참고하여 발암등급, 변이원성/생식독성, 과민성으로 분류하여 산정하였다. 위해점수는 각 물질의 초과발암위험도 및 독성위험값을 이용하여 발암성과 독성을 평가하였고 규제점수는 국내, 국제 규제여부에 따라 산정하였다.

(Table 13.)은 물질별 고득점 순으로 나타난 것으로 Benzene이 89.0점으로 가장 높았으며 Formaldehyde, Toluene, Ethylbenzene, Acetaldehyde, m,p,o-Xylene, Styrene 등 순으로 대부분 규제항목이 선순위를 차지했고 미규제 항목 중에는 Acetaldehyde이 70점으로 가장 높았고 Trichloroethylene과 1,2-dichloroethane이 52점, Methyl Isobutyl Ketone 45점, 1,4-dichlorobenzene 43점 등 순으로 나타났다.

4.2.2 우선관리 대상물질 선정

본 연구에서는 실내 오염물질의 효율적인 관리를 위해 4.2.1에서 산정한 CRS점수를 이용하여 3.2.3에서 제시한 기준에 따라 관리가 필요한 물질을 (Table 14.)과 같이 1~3순위로 구분하여 도출한 후 이 중 1순위로 도출된 오염물질을 우선 관리 대상물질로 선정하였다.

1순위는 CRS점수가 50점 이상인 물질로 Benzene, Formaldehyde, Toluene, Ethylbenzene, Acetaldehyde, m,p,o-Xylene, Styrene, Trichloroethylene, 1,2-dichloroethane으로 산출되었고 이 중 현재 관리가 되고 있는 물질을 제외한 Acetaldehyde, Trichloroethylene, 1,2-dichloroethane이

Table 13. Total score of major factors using CRS

Compound	E (30)	T (30)	H (20)	R (20)	Total
Benzene	22	30	17	20	89
Formaldehyde	20	20	20	20	80
Toluene	27	20	7	20	74
Ethylbenzene	25	10	17	20	72
Acetaldehyde	20	20	20	10	70
m,p,o-Xylene	20	10	10	20	60
Styrene	20	10	5	20	55
Trichloroethylene	7	20	20	5	52
1,2-dichloroethane	12	20	20	0	52
Methyl Isobutyl Ketone	20	20	5	0	45
1,4-dichlorobenzene	13	10	15	5	43
1,2-dichloropropane	12	10	17	0	39
Hexane	17	20	0	0	37
1,2,4-trimethyl-benzene	17	10	10	0	37
Chloroform	12	10	15	0	37
n-Butanol	20	10	0	0	30
Propionaldehyde	10	10	10	0	30
n-Nonane	20	0	10	0	30
Tetrachloroethylene	3	10	10	5	28
n-Heptane	17	10	0	0	27
n-Octane	17	10	0	0	27
1,2,3-Trimethyl-benzene	17	0	10	0	27
Acetone	20	0	5	0	25
Alpha-Pinene	20	0	0	5	25
2,2,4-Trimethyl-pentane	12	10	0	0	22
1,3,5-Trimethyl-benzene	12	10	0	0	22
2,4-Dimethyl-Pentane	10	10	0	0	20
Butyraldehyde	20	0	0	0	20
n-Butylacetate	20	0	0	0	20
Beta-Pinene	20	0	0	0	20
n-Decane	20	0	0	0	20
Nonanal	20	0	0	0	20
Decanal	20	0	0	0	20
n-Tridecane	20	0	0	0	20
n-Undecane	17	0	0	0	17
n-Dodecane	17	0	0	0	17

*E: Exposure, T: Toxicity, H: Hazard, R: Regulation

Table 14. Total score of major factors using CRS

Grade	Compound	Detection rate (%)	Harzard level	Risk		CRS Score					Condition
				ECR	HQ	E	T	H	R	Total	
1	Benzene	100	CMH	6.2.E-06	0.0267	22	30	17	20	89	CRS > 50
	Formaldehyde	100	CH	1.1.E-04	0.8910	20	20	20	20	80	
	Toluene	100	RH	-	0.0255	27	20	7	20	74	
	Ethylbenzene	100	C	6.2.E-05	0.0250	25	10	17	20	72	
	Acetaldehyde	100	CH	1.2.E-05	0.6286	20	20	20	10	70	
	m,p,o-Xylene	100	M	-	0.2656	20	10	10	20	60	
	Styrene	100	C	-	0.0083	20	10	5	20	55	
	Trichloroethylene	69	CM	2.0.E-05	0.1082	7	20	20	5	52	
	1,2-dichloroethane	84	CH	3.5.E-06	0.4261	12	20	20	0	52	
2	1,4-dichlorobenzene	36	C	1.8.E-05	0.0020	13	10	15	5	43	ECR > 1E ⁻⁶
	Chloroform	88	C	8.9.E-06	0.0040	12	10	15	0	37	
	1,2-dichloropropane	86	C	3.8.E-06	0.0959	12	10	17	0	39	
	Propionaldehyde	40	H	-	0.3784	10	10	10	0	30	TI > 0.1
	n-Nonane	97	-	-	0.1175	20	0	10	0	30	
	1,2,4-trimethylbenzene	96	H	7.0.E-03	0.2054	17	10	10	0	37	
	1,2,3-trimethylbenzene	90	-	5.0.E-03	0.1276	17	0	10	0	27	CMRH & Detection rate> 40%
3	Hexane	99	RH	-	-	17	20	0	0	37	
	n-Butanol	100	H	-	-	20	10	0	0	30	
	n-Heptane	91	H	-	-	17	10	0	0	27	
	n-Octane	97	H	-	-	17	10	0	0	27	
	2,2,4-Trimethylpentane	76	H	-	-	12	10	0	0	22	
	1,3,5-Trimethylbenzene	87	H	-	-	12	10	0	0	22	

*E: Exposure, T: Toxicity, H: Hazard, R: Regulation

우선관리 대상물질로 선정되었다.

Acetaldehyde, 1,2-dichloroethane, Trichloro-ethylene은 국내에서는 관리되지 않고 있는 물질이지만 이미 국외에서는 위해성 평가를 기반으로 각 오염물질의 가이드라인을 설정하여 관리하고 있다. 또한 국내에서도 (Table 15.)와 같이 선행 연구에 의해 관리 대상물질로 제안된 적이 있으며 위해성 평가 및 국외 기준을 토대로 한 권고 기준안까지 제시되기도 하였음에도 아직 국내에서는 규제되고 있지 않다.

특히 Acetaldehyde는 실내오염 실태조사에서도 기존의 규제항목보다 높게 검출되었으며 위해성을 기반으로 한 CRS 평가에서 규제점수를 제외한 노출, 독성, 위해에서 모두 고득점으로 산정되어 우선적인 관리가 필요한 물질로 판단된다.

1,2-dichloroethane은 실태조사에서는 높은 검출량을 보이진 않았지만 CRS 평가의 노출, 독성, 위해 부문에서 높은 점수로 산정되어 Acet-aldehyde와 더불어 신규규제 대상물질로 검토할 필요가 있다.

Trichloroethylene의 경우 기존 연구 결과와 달리 본 연구에서는 우선관리 대상물질 1순위로 도출되었다. 이는 실측데이터의 영향으로 기존 연구의 대부분이 규제물질에 국한되어 있었기 때문에 Trichloroethylene과 같은 미규제 물질에 대한 데이터가 부족하고 특히 신축공동주택을 대상으로 한 연구 또한 미흡하여 기존 CRS평가에서는 실측치에 영향을 받는 노출과 위해 점수가 저평가되었을 가능성이 컸을 것으로 판단된다.

또한 기존 연구에 이용됐던 데이터는 대부분 신축공동주택 권고기준 관련 법 시행 전에 분석했던 값으로 이후 규제물질이 포함되지 않은 대체물질의 사용량이 증가하면서 기존에 검출되지 않은 신규 물질의 검출량도 증가한 것으로 보인다.

기존 연구 실적이 부족한 신규 물질의 경우 앞서 언급한 것과 마찬가지로 실측데이터에 따라 CRS

평가에도 상당한 영향을 미치므로 신규 규제물질로 선정하여 검토하기 보다는 지속적인 모니터링을 통해 오염물질의 연속성과 반복성을 확인할 수 있는 데이터 축적이 더 중요할 것으로 사료된다.

2순위는 CRS점수는 낮지만 위해도가 높은 물질을 선정하였고 위해도의 경우 발암물질은 초과발암위해도(ECR)가 1×10^{-6} 이상, 비발암물질은 독성 위험값(HQ)가 0.1 이상인 물질을 위해도가 높은 물질로 정의하였다. 이에 2순위는 1,4-dichlorobenzene, Chloroform, 1,2-dichloropropane, Propionaldehyde, n-Nonane, 1,2,4-trimethylbenzene, 1,2,3-trimethylbenzene이 선정되었다.

CRS 총점과 위해도가 낮더라도 검출율 40 % 이상인 물질을 3순위로 선정하였고 Hexane, n-Butanol, n-Heptane, n-Octane, 2,2,4-trimethyl-pentane, 1,3,5-trimethylbenzene으로 산출되었다.

본 연구에서 2, 3순위의 오염물질들은 우선관리 대상물질은 아니지만 발암물질과 독성 등 위해도가 높은 물질들로 향후에도 계속적으로 발생되는지 감시하고 오염물질들의 주발생원을 파악하는 등의 사전 검토가 필요할 것으로 판단된다.

Table 15. Guideline of pollutants in International and advanced study

Compound	Guideline($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
	International	Advanced study
Acetaldehyde	100-1000	150
1,2-dichloroethane	-	10
Trichloroethylene	2.3-230	-

V. 결론

인천 관내 신축공동주택을 대상으로 카보닐 화합물과 휘발성유기화합물을 조사하여 실내 공기질 오염 실태를 파악하고 위해성 평가를 기반으로 우선관리 대상물질을 선정한 결과는 다음과 같다.

1. 전체 오염물질 중 가장 높게 검출된 물질은 Toluene이고 Butyraldehyde > m,p,o-Xylene > Ethylbenzene > Acetone > n-Butanol > Formaldehyde > Styrene > n-Butylacetate > Acetaldehyde > Methyl Isobutyl Ketone 순으로 규제물질보다 높게 검출된 물질은 Butyraldehyde, Acetone, n-Butanol, Acetaldehyde로 나타났다.
 2. 전체 중 규제물질을 제외한 오염물질 중 Butyraldehyde의 검출량이 가장 높았고 Acetone > n-Butanol > n-Butylacetate > Acetaldehyde > Methyl Isobutyl Ketone > n-Tridecane > n-Nonane > Nonanal > Decanal 순으로 나타났다.
 3. 미규제 물질 중 화학적 특성에 따른 그룹별 상위 검출 오염물질은 카보닐화합물 중 Butyraldehyde, Acetone, 방향족탄화수소 중 1,2,4-trimethylbenzene, 지방족탄화수소 중 n-Tridecane, n-Nonane, n-Decane, 할로젠화탄화수소 중 Trichloroethylene, 1,4-dichlorobenzene, 1,2-dichloroethane, 알데하이드에서 Nonanal, Decanal, 아세테이트는 n-Butylacetate, 케톤은 Methyl Isobutyl Ketone, 테르펜은 Alpha-Pinene 으로 나타났다.
 4. 발암성 여부에 따른 미규제 물질 검출 결과, 비발암성 물질에서는 Butyraldehyde, Acetone n-Butanol, n-Butylacetate이 선순위로 나타났고 발암물질은 Acetaldehyde, Trichloroethylene, 1,4-dichlorobenzene, 1,2-dichloroethane 순으로 나타났다.
 5. 검출량을 기반으로 평가한 미규제 오염물질 중 관리가 필요하다고 판단되는 물질은 Butyraldehyde, Acetone, Acetaldehyde, n-Butylacetate로 나타났다.
 6. CRS(Chemical ranking system)기법을 이용한 점수 산정 결과, Benzene > Formaldehyde > Toluene > Ethylbenzene > Acetaldehyde > m,p,o-Xylene > Styrene 등 순으로 대부분 규제 항목이었으며 미규제 항목 중에는 Acetaldehyde > Trichloroethylene > 1,2-dichloroethane > Methyl Isobutyl Ketone > 1,4-dichlorobenzene 등 순으로 나타났다.
 7. 미규제 물질 중 우선관리 대상물질 1순위는 Acetaldehyde, Trichloroethylene, 1,2-dichloroethane로 선정되었다. 이 중 Acetaldehyde, 1,2-dichloroethane은 신규 규제항목으로 검토할 필요가 있으나 Trichloroethylene은 선행 연구의 미흡으로 금회 연구 결과만으로 우선관리 대상물질로 평가하기에는 신뢰도가 다소 부족하다고 사료되어 지속적인 모니터링을 통한 데이터 축적이 더 필요할 것으로 보인다.
 8. 2, 3순위의 오염물질들은 우선관리 대상 물질은 아니지만 발암물질과 독성 등 위해도가 높은 물질들로 향후 계속적인 감시와 주 발생원 파악 등의 사전 검토가 요구된다.
- 따라서 본 연구를 통해 신축공동주택에서 발생하는 미규제 물질의 오염 실태를 파악하여 그동안 미흡했던 국내 신축공동주택의 미규제 오염물질 연구를 위한 기초자료를 확보하였고, 위해성 평가를 통해 우선관리 대상 물질로 선정된 신규 규제물질은 향후 신축공동주택 정책 자료로 활용이 가능할 것이다.

VI. 참고문헌

1. 임영옥, 이윤규, 양지연, 김현호, 이철민. (2015). 위해성평가 기반 실내공기질 기준 합리화 연구, 환경부.

2. Lim, Y.W., Yang, J.Y., Kim, H.H. Lee. Y.G., Kim, Y.S., Jang, S.K., Sohn, J. R., Roh, Y.M., Shin, D.C. (2006), Health risk assessment in terms of VOCs at newly-built apartment house, Journal of Korean Society for Indoor Environment, 3(3), 211-223.
3. Kim, J.C., Kim. Y.S., Roh, Y.M., Hong, S.C., Lee, C.M., Jun, H.J., (2007), Health Risk Assessment of Indoor HAPs in New Apartments, Korean Society of Environmental Health, 33(1), 1-10.
4. Sim, S.H., Kim, Y.S. (2006), Characterization and Assessment of Indoor Air Quality in Newly Constructed Apartments, Korean Society of Environmental Health, 32(4), 275-281.
5. 이윤규, 김윤신, 김윤택, 한길원, 손종렬, 노용만. (2005), 신축공동주택 실내공기질 권고기준 설정 연구(II), 국립환경과학원
6. 공성용, 이희선. (2004), 실내공기질 관리 제도 발전방안에 관한 연구, 한국환경 정책평가연구원
7. Han. K.W., Kim. H.J., Cheong. C.H., Kim. Y.D., Lee. Y.G. A Study on the Actual Condition of the Indoor Air Quality in the New Apartment House, Journal of the architectural institute of Korea, 22(9), 267-274
8. Kerns WD, Pavkov KL and Donofrio DJ et al. (1983), Carcinogenicity of formaldehyde in rats and mice after long-term inhalation exposure, Cancer Res, 43, 4382-4392.
9. M. Rehwagen, U. Schlink, O. Herbarth. (2003), Seasonal cycle of VOCs in apartments, Indoor air, 13, 283-291.
10. Park. J.W., (2010), Legal System to Control Air Quality in Living Spaces, Korea Legislation Research Institute.
11. Lee, K.H., Kim, B.L., Kim, J.K., Song, H.I., Kim, C.G., Im, H.B., (2007), A Study on Characteristics Of Aldehydes and VOCs in New Buildings, The report of Gyeonggi-do institute of health & environment, 189-197.
12. Yu, H.K., (2005), An Experimental Study on the Major Causes and Emission characteristics of Indoor Air Pollutants in Newly-Constructed Multi-Family Houses, The Graduate School of Chung-Ang University.