

물질수지를 이용한 학교 실내환경의 포름알데히드 (HCHO) 배출량 산정에 의한 실내공기질 개선 평가

양원호^{*} · 손부순¹⁾ · 김대원²⁾ · 김영희 · 변재철 · 정순원¹⁾

대구가톨릭대학교 산업보건학과 · ¹⁾순천향대학교 환경보건학과 ·
²⁾대구가톨릭대학교 환경과학과

Evaluation of Indoor Air Quality Improvement by Formaldehyde Emission Rate in School Indoor Environment Using Mass Balance

Won-Ho Yang^{*} · Bu-Soon Son¹⁾ · Dae-Won Kim²⁾ · Young-Hee Kim
· Jae-Cheol Byeon · Soon-won Jung¹⁾

*Department of Occupational Health, Catholic University of Daegu ·
¹⁾Department of Environmental Health Science, Soonchunhyang University ·
²⁾Department of Environmental Science, Catholic University of Daegu ·*

Schools have significant and serious indoor environmental health problem, of which indoor air quality (IAQ) in school building may affect the health of the students and indirectly affect learning performance. Schools are of special concern when regarding indoor exposure to air pollutants, because students are particularly sensitive to pollutants and spend a significant amount of time in that environment. Therefore researches for improvement of indoor air quality have been developed such as installation of air cleaning device, ventilation system, titanium dioxide(TiO₂) coating and so on. However, it is difficult to evaluate the magnitude of improvement of indoor air quality in field study because indoor air quality can be affected by source generation, outdoor air level, ventilation, decay by reaction, temperature, humidity, mixing condition and so on.

In this study, evaluation of reduction of formaldehyde emission rate in school indoor environments by far-Infrared ray

coating material was carried out using mass balance model in indoor environment. we proposed the evaluation method of magnitude of improvement in indoor air quality, considering outdoor level and ventilation. Since simple indoor concentration measurements could not properly evaluate the indoor air quality, outdoor level and ventilation should be considered when evaluate the indoor air quality.

Key Words : school, indoor air quality, evaluation, formaldehyde(HCHO), ventilation

I. 서론

인간은 성인의 경우 일반적으로 하루에 대략 1.5 kg의 음식을 섭취하

고 2 kg 정도의 물을 마시며, 공기는 이보다 거의 10배에 달하는 약 13 kg 정도를 마셔야 살 수 있고 단 몇 분 만 호흡을 멈추더라도 곧 사망하게

될 만큼 중요하다(양원호, 2003). 특히, 자연적으로 희석되는 대기오염과는 달리 실내공기는 한정된 공간에서 오염된 공기가 지속적으로 순환하면

서 실내공기 오염농도가 누적되어 실외 대기오염으로 인한 인체 영향보다 더 큰 건강영향을 유발할 수 있다(Jones, 1999).

우리나라의 초등학교부터 고등학교 학생들은 신체와 정신의 성장발육이 왕성한 시기이기 때문에 보건학적으로 중요한 인구집단이며 학교 생활의 대부분을 교실에서 보내고 있으므로 교실의 실내환경관리는 매우 중요한 문제이다(손종렬 등, 2003). 이러한 학교건물의 경우 단위 면적당 재실인원이 많고 마감재로 사용되는 재료로부터 유해물질이 발생된다. 이러한 물질로는 포름알데히드(formaldehyde: HCHO), 휘발성 유기화합물(volatle organic compounds: VOCs), 석면 등이 있으며, 겨울철 난방기구에서 발생하는 유해가스 등의 화학적 요인이 발생된다. 이 중 HCHO는 흡입에 의해 인체에 들어오며 주로 상기도의 코와 눈에 자극(염증, 가려움, 목따가움)을 받는다. 저농도의 HCHO에 노출되면 눈, 코, 목, 피부를 자극하며, 천식에 더민감할 수 있다. HCHO는 동물실험결과 코에 암을 일으키는 물질로 알려져서 의심되는 발암성 물질(Group 2A)로 분류되고 있으나, 농도가 매우 낮기 때문에 쉽게 검출되지 않으며 환기량이 부족할 경우 실내에 잔류하게 되어 건강에 해를 미치게 되어 학생들이 두통을 호소하는 등 새학교 증후군(New School Building Syndrome: NSBS) 현상이 나타나고 있다(윤충식 등, 2004).

학교 실내공기질에 대한 연구는 선진 외국을 중심으로 다양한 연구가 수행되고 있다. 이탈리아 대학교의 도서관에서 조사된 VOCs

농도는 평균 $433 \pm 267 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 나타내었으며(Fantuzzi et al., 1996), Daisey et al.(2003)은 학교에서 새로 구입한 책상에 따른 고 농도의 HCHO 노출 가능성을 보고하였다. 또한 프랑스 학교 교실 실내공기질에 따른 건강위해성(Meininghaus, 2003), 영국 학교 교실의 실내공기질 악화에 따른 결석을 증가(Rosen and Richardson, 1999), 홍콩 학교에서 불충분한 환기에 따른 고 농도의 CO₂ 농도(Lee and Chang, 2000)를 보고하는 등 국내·외적으로 학교 교실 실내공기질의 연구는 학생들이 신체와 정신의 성장발육이 왕성한 시기에 있으므로 보건학적으로 중요한 인구집단이기 때문이다(백남원, 1991).

학교건물의 쾌적한 실내 환경을 만들기 위해 세계 여러 나라에서는 학생 1인당 공급되어야 할 외기량을 교실의 용도에 따라 규정하고 있으며, 재실자의 쾌적성을 위한 최소한의 필요환기량을 규정하고 있다. 우리나라에서도 최근 '학교보건법' 개정에 따라 교실의 환경위생기준이 제정되어 기계적 환기시설을 이용한 일정 수준의 환기를 하도록 의무화 하고 있지만 이 기준을 만족하는 학교는 거의 없는 실정이다.

본 연구는 리모델링(remodeling)한 중학교 과학실과 신 책상을 구입한 고등학교 도서관을 대상으로 HCHO 제거용 원적외선 방사 코팅 물질을 이용하여 HCHO 발생율의 감소 정도를 실내공기질 모델에 적용하여 평가하는 것이다. 이 평가방법은 실내공기질의 실외농도 및 환기 등의 영향요인을 고려한 것으로 학교교실 실내환경 뿐만 아니라 새집증후군(Sick House

Syndrome: SHS)과 같이 신축건물에서 발생하는 공기오염물질 발생량의 감소 정도를 평가할 수 있는 방법을 제안할 수 있을 것이다.

II. 연구방법

경상북도에 위치한 A 중학교의 리모델링한 과학실과 대구에 위치한 B 고등학교의 새로 신 책상을 구입한 도서관을 대상으로 원적외선 방사물질의 코팅에 의한 HCHO 배출량 감소 정도를 현장 실험하였다. 본 연구에서 대상 교실은 리모델링하기 전(신 책상 구입 전), 리모델링한 후(신 책상 구입 후), 그리고 원적외선 방사물질 코팅 후 각각 교실 실내에서 2개의 지역시료, 교실 실외 공기 1곳에서 HCHO를 측정 후, 즉시 환기량을 측정하였다. A 중학교 과학실의 체적은 230 m³, B 고등학교 도서관의 체적은 265 m³으로 실측되었다.

HCHO 발생량 감소에 이용된 코팅물질은 물질분자의 진동상태를 변화시키고 물질의 에너지균형을 유도하는 광에너지인 합성파장을 만들어 이를 액상에 원적외선을 방사하여 물질 분자를 구성하는 원자의 운동방향과 성질을 바꾸어 계의 용존산소를 활성화함으로써 HCHO를 효과적으로 분해할 수 있는 기능을 가지고 있다(특허 제 0406650, 특허청, 2003). 원적외선 방사물질은 액상으로 컴프레서(compressor)를 이용하여 A 중학교에서는 리모델링한 부분인 불박이 초자기구 보관함, 벽 등 외부 표면에 코팅하였고, B 고등학교에서는 신 책상 외부 표면에 코팅하였다. 측정기간은 2005년 1월~2월 동안 수행하였다.

(1) 시료채취방법

접수일 : 2005년 4월 4일, 채택일 : 2005년 9월 12일

† 교신저자 : 양원호(경북 경산시 하양읍 대구가톨릭대학교 산업보건학과

Tel: 053-850-3739, Fax: 053-850-3736, E-mail: whyang@cu.ac.kr)

포름알데히드(HCHO)의 시료채취는 환경부의 실내공기질 공정시험방법에 준하여 수행하였다(환경부, 2004). Fig. 1과 같이 실내출입문, 창문 등을 개방하고 이 상태를 30분 이상 지속한 후, 외부공기와 면하는 개구부(창호, 출입문, 환기구 등)를 5시간 이상 모두 닫아 실내의 공기의 이동을 방지한 후 포집하였다.

(2) HCHO 측정 및 분석

실내공기 중에 존재하는 포름알데히드 농도를 측정하기 위한 시험방법으로 측정대상 실내환경인 과학실과 도서관에서 각각 1000 mL/min의 유량으로 30분 동안 채취하여 2,4-디니트로페닐히드라진(2,4-DNPH; 2,4-dinitrophenylhydrazine, Supelco, USA)으로 유도체화한 후, 이 2,4-DNPH 유도체를 고성능액체 크로마토그래프(HPLC)에 주입하여 자외선흡광검출기의 흡수파장 360 nm에서 검출되는 크로마토그램의 면적으로 포름알데히드의 농도를 구하였다. 시료는 분석 전까지 냉장보관 하였으며, 실내공기질 공정시험법 및 NIOSH 2016 방법을 참조하여 분석하였다(환경부, 2004, NIOSH, 2003). 시료는 3 mL 아

세토나이트릴(acetonitrile)에 이용하여 추출하였다. 추출 용액은 2 mL 바이엘에 옮긴 후, HPLC/UV의 360 nm에서 분석하였다. 컬럼은 C8(150 mm × 3.9 mm × 5 μm) 역상 컬럼을 이용하였다. 이동상은 아세토나이트릴과 증류수를 45:55의 비율로 혼합한 용액을 이용하였으며, 컬럼의 유속은 1.5 mL/min으로 유지하였다. 분석시 시료 주입량은 20 μL이었다. 기기 및 분석조건은 Table 1과 같다. 표준용액은 2,4-DNPH 유도체화 포름알데히드 표준용액(100 ppm, Supelco, USA)을 아세토나이트릴로 희석하여 이용하였다. 0.06~3.85 ppm 범위의 4개 농도수준으로 제조하였으며, 각 피크의 면적과 농도를 이용하여 검량선을 작성하였다.

(3) 환기량 측정

환기량은 추적가스(tracer gas)를 이용하여 직접 측정할 수 있다. 연구 대상인 A 중학교 과학실 및 B 고등학교 도서관의 환기상태는 기계적 환기장치가 없었기 때문에 창문에 의한 자연환기만 존재하는 것으로 조사되었다. 본 연구에서는 HCHO 측정 후 즉시 CO₂ 표준가스를 이용하여 과학실 CO₂ 농도가

약 1500 ppm에 도달했을 때 CO₂ 표준가스를 정지시키고 5분마다 CO₂ 농도를 측정하여 과학실의 CO₂ 농도가 약 600 ppm 정도에 이르렀을 때 측정을 중지하였다. CO₂ 표준가스 분사 전 및 분사 중에 Fan 6대를 이용하여 A 중학교의 과학실 및 B 고등학교의 도서관을 각각 완전혼합(complete mixing) 상태로 하였으며 CO₂ 농도가 약 1500 ppm에 이르면 Fan은 정지시키고 약 10분 후부터 CO₂ 농도를 측정하였고, 측정된 농도 값은 data-logger에 의해 자동으로 저장되도록 하였다. CO₂ 농도 측정은 1 point에서 하였으며 과학실과 도서관 중앙에서 각각 측정하였다. 환기량 측정은 추적가스 농도 감소법으로 회귀방법(regression method)을 이용하여 공기 환기횟수(Air Change per Hour; ACH)를 계산하였다(양원호 등, 2000).

(4) 실내공기질 모델을 이용한 발생량

물질수지에 의한 실내공기질 모델은 실내공기오염물질 농도와 관련 변수들 사이의 관계를 나타낼 수 있는 유용한 방법이며, 공기오염물질의 확산과 이동, 공기오염물질 발생강도, 환기율, 제거율 등의 요인들을 식(1)로 나타낼 수 있다 (Yang et al., 2004).

$$\frac{dC_i}{dt} = mC_o + \frac{SER}{V} - mC_i - \frac{R}{V} \quad (1)$$

여기서, C_i=indoor concentration (μg/m³), C_o=outdoor concentration (μg/m³), I=air exchange per hour (hr⁻¹), SER=source emission rate (μg/hr), R=removal rate (μg/h), V=volume of the space (m³), t=time (hr), and m=mixing factor (0 ≤ m ≤ 1).

식 (1)에서 실내 공기오염물질의 감소율(R)은 감소상수(K, hr⁻¹)

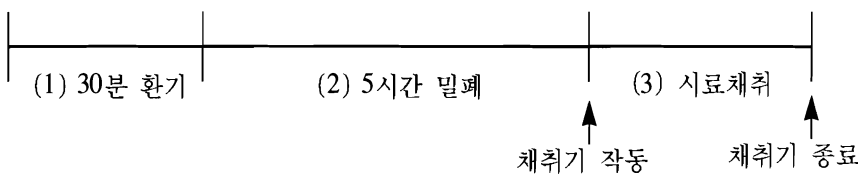


Fig. 1. Sampling process for formaldehyde in schoolroom.

Table 1. Instrument and analysis condition for HCHO concentration

Instrument	HPLC (Waters 2690)
Column	UV Detector (Waters 2487), 360 nm
Effluent	C8(Symmetry HPLC column), Reversed-phase
Flow rate	Acetonitrile:DW = 45:55
Injection Volume	1.5 mL/min
	20 μL

와 실내에 존재하는 질량(VCI)으로 나타낼 수 있다.

$$R = KVC_i \quad (2)$$

식 (2)을 식 (1)에 대입하고 대상 실내공간에서 완전혼합(completely mixed condition, m=1)을 가정하면, 식 (1)은 다음과 같이 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dC_i}{dt} = IC_o + \frac{SER}{V} - IC_i - KC_i \quad (3)$$

실내공기질 모델에서 HCHO의 농도가 평형상태($t=\infty$)에 도달할 때 시간에 따른 농도 변화는 정상상태($dC_i/dt=0$)로 가정할 수 있으며, HCHO 측정동안 제거율을 없는 것($K=0$)으로 근사하게 가정하면 HCHO의 발생량(source emission rate: SER)은 다음과 같다.

$$SER = VI(C_i - C_o) \quad (4)$$

III. 연구결과 및 고찰

본 연구 대상인 과학실과 도서

관에서 HCHO의 발생량은 온도 및 습도에 영향을 받을 수 있다. Sekine와 Nishimura (2001)은 일반 실내환경에서 HCHO의 발생량에 실내농도는 온도에 의해 크게 의존하기 때문에 식 (5)와 같이 회귀곡선을 이용한 온도에 따른 보정을 제시하였다. 본 연구에서는 Sekine와 Nishimura의 경험식을 이용하여 온도보정을 하였고, 습도는 보정경험식에 대한 문헌 및 연구자료가 없기 때문에 하지 못했다. 측정기간 동안 B 중학교의 과학실의 온도 범위는 7~11℃ 및 상대습도 범위는 30~45%를 나타내었고, B 고등학교의 도서관의 온도 범위는 8~12℃ 및 상대습도 범위는 33~50%를 보였다.

$$C_{20} = \frac{\exp(0.1066 \times 20)}{\exp(0.1066 \times T_r)} - C_r \quad (5)$$

여기서, C_{20} : Indoor HCHO concentration at 20℃, T_r : mean room temperature (℃), C_r : measured indoor HCHO concentration

본 연구에서 A 중학교의 리모델링

한 과학실의 결과를 Table 2에 나타내었다. 결과에 의하면 리모델링한 후 및 원적외선 방사물질 코팅전에 리모델링 자재 등에서 방출되는 HCHO의 발생률은 5703.13 $\mu\text{g/hr}$ 이었으며, 코팅후 HCHO의 발생률은 4053.06 $\mu\text{g/hr}$ 로 감소하였다. 따라서 발생량 감소율은 대략 28.9%의 높은 효율성을 나타내었다. 하지만 학교 실내 HCHO 농도 값으로 계산한 감소율은 대략 45.5%를 나타내어, 현장의 실내공기질에서 건축자재 방출량 감소 정도를 평가할 때 단순히 농도측정만으로는 그 개선 정도를 명확히 평가할 수 없음을 나타내고 있다. 즉, 실내공기질은 환기에 영향을 받기 때문에 그 요인을 반드시 고려해야 한다.

B고등학교의 결과는 Table 3에 나타내었다. 실내공기질 모델을 이용한 식 (4)에 의한 결과를 살펴보면 도서관에서 수 책상 구입 전의 HCHO의 발생량은 94.61 $\mu\text{g/hr}$ 이었으나 구입 설치후의 발생량은 3830.58 $\mu\text{g/hr}$ 으로 40배 증가하였다. 원적외선 방사물질 코팅 1일 후의

Table 1. Instrument and analysis condition for HCHO concentration

Sampling	Sample site	Conc. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	ACH (1/hr)	SER ($\mu\text{g}/\text{hr}$)	Standard	
Before remodeling	Outdoor	4.1		0.002	- Ministry of Environment (Korea) : 0.1ppm	
	Indoor	7.3	($R^2=0.954$)			
	Indoor					
After remodeling	Outdoor	9.2		5703.13		- Ministry of Education (Japan) : 0.08ppm
	Indoor	252.3	($R^2=0.95$)			
	Indoor					
1 day after coating	Outdoor	4.1		4053.036		
	Indoor	137.6	($R^2=0.94$)			
	Indoor					

* Volume: 230 m^3

SER은 3341.39 $\mu\text{g/hr}$ 로 감소하였고, 2일, 3일 후에는 각각 2811.12 $\mu\text{g/hr}$, 2130.20 $\mu\text{g/hr}$ 으로 계속적으로 감소 상태를 나타내었다. 이는 각각 12.8%, 26.6%, 44.4%의 효율성을 나타내었다. 반면 실내환경에서 측정된 실내 HCHO 농도는 코팅전에 36.5 $\mu\text{g/m}^3$ 인 반면, 코팅 후는 51.9 $\mu\text{g/m}^3$, 51.7 $\mu\text{g/m}^3$, 42.45 $\mu\text{g/m}^3$ 으로 오히려 평균 33%의 증가율을 보였다. 이 결과는 B 중학교에서 리모델링한 과학실의 경우와 마찬가지로 실내공기질 평가방법시 실외공기와 환기량을 반드시 고려해야 함을 나타낸 것이다.

IV. 결론

본 연구는 리모델링한 중학교 과학실과 신 책상을 구입한 고등학교 도서관을 대상으로 HCHO 제거용 원적외선 방사 코팅물질을 이용하여 HCHO 발생율의 감소 정도를 실내공기질 모델에 적용하여 평가하였다. 실제 현장에서 실내

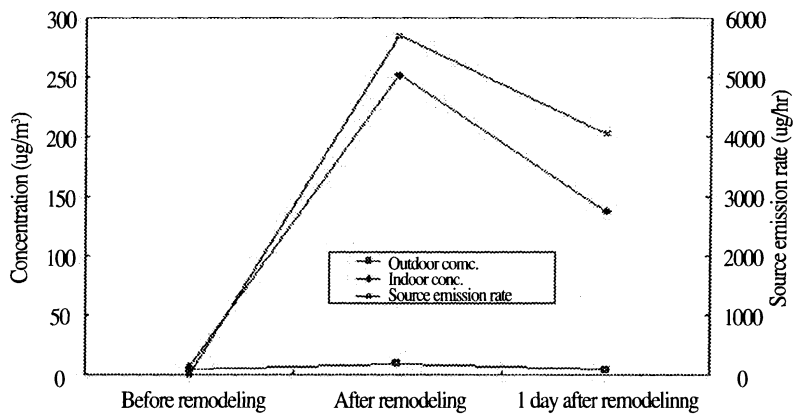


Fig. 2. Comparison between indoor HCHO concentrations and source emission rates of HCHO.

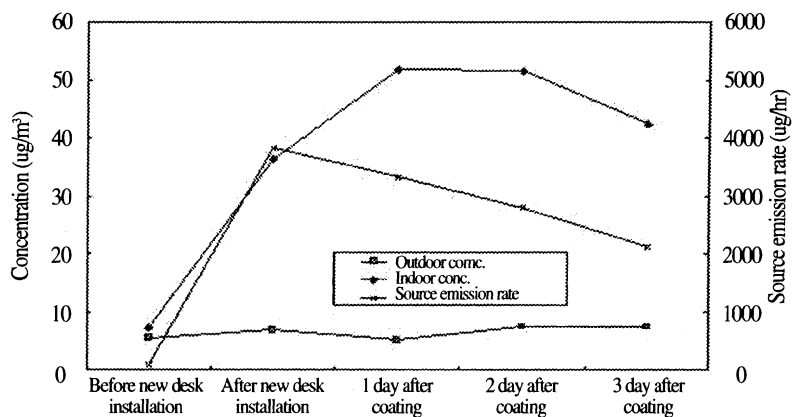


Fig. 3. Comparison between indoor HCHO concentrations and source emission rates of HCHO.

Table 3. Source emission rate of HCHO in library with new purchased desk sampling

Sampling	Sample site	Conc. ($\mu\text{g/m}^3$)	ACH (1/hr)	SER ($\mu\text{g/hr}$)	Standard
Before new desk installation	Outdoor	5.6			
	Indoor	7.3	0.21	94.61	
	Indoor		($R^2=0.94$)		
After new desk installation	Outdoor	7.0			- Ministry of Environment (Korea) : 0.1ppm
	Indoor	36.5	0.49	3830.58	
	Indoor		($R^2=0.99$)		
1 day after coating	Outdoor	5.2			- Ministry of Education (Japan) : 0.08ppm
	Indoor	51.9	0.27	3341.39	
	Indoor		($R^2=0.89$)		
2 day after coating	Outdoor	7.5			
	Indoor	51.7	0.24	2811.12	
	Indoor		($R^2=0.95$)		
3 day after coating	Outdoor	7.5			
	Indoor	42.45	0.23	2130.20	
	Indoor		($R^2=0.97$)		

* Volume: 265 m³

도를 실내공기질 모델에 적용하여 평가하였다. 실제 현장에서 실내 공기질 개선을 위한 노력이 다양한 방법으로 연구되고 있으나, 그 개선 정도를 평가하는 것에 현장 실무자들은 어려움을 갖고 있다. 실내공기질은 실외공기 수준, 환기, 반응을 통한 감소, 실내 발생량, 실내기류, 온도, 습도 등 다양한 요인에 영향을 받는다. 그동안 실내공기질 개선 정도를 단순히 실내농도 측정만으로는 명확하게 평가할 수 없었다. 본 연구는 물질수지를 이용한 실내공기질 모델에 적용하여 개선 정도를 평가하였다. 결과에 의하면, 단순히 실내공기 농도 측정으로는 개선 정도를 파악할 수 없었으며 실외공기질 및 환기를 고려하여야 함을 실험을 통하여 증명하였다. 이 적용방법은 이산화티탄(TiO₂)을 이용한 광촉매 코팅, 공기청정기 설치, 환기장치 개선 등 기타 다른 방법에 의해 실내공기질 개선 정도를 평가하는데 바로 적용할 수 있을 것이다.

REFERENCES

- 백남원. 학교 환경. 한국학교보건학회지 1991;4: 31-38
- 손종렬, 변상훈, 김영환, 김종혁, 조운수, 이재영, 박운주. 서울시 일부 학교의 실내 공기질 조사 및 인식도 평가. 대한위생학회지 2003;18(3):101-110
- 양원호. 실내공기 오염물질의 노출 및 위해성평가. 대한주택공사 주택도시 2003;79:102-117
- 양원호, 배현주, 이기영, 정문호. 측정 시간에 따른 거주주택의 환기량 계산 오류에 관한 연구. 한국환경위생학회지 2000;26(3):50-54
- 윤충식, 정지연, 이광용, 박동욱, 박두용. 유아교육시설의 위치 및 실내·실외에 따른 포름알데히드 농도 변화. 한국환경보건학회지 2004;30(3):259-263
- 특허청. 원적외선 방사물의 제조 방법 및 시스템 특허 제 04046650, 특허증 2003.
- 환경부. 실내 공기질 공정 시험 방법 2004;46-51
- Chang M and Lee SC. Indoor and outdoor air quality investigation at schools in Hong Kong. Chemosphere 2000;41: 109-113
- Daisey JM, Angell WJ and Apte MG. Indoor air quality, ventilation and health symptoms in schools: an analysis of existing information. Indoor Air 2003;13: 53-64
- Fantuzzi G, Aggazzotti G, Righi E, Cavazzuti L, Predieri G and Franceschelli A. Indoor air quality in the university libraries of Modena (Italy). the Science of the Total Environment 1996;193: 49-56
- Jones AP. Indoor air quality and health. Atmospheric Environment 1999; 33: 4535-4564.
- Meininghaus R, Kouniali A, Mandin C and Cicolella A. Risk assessment of sensory irritants in indoor air - a case study in a French school. Environment International 2003;28: 553-557
- NIOSH. NIOSH Manual of Analytical Methods(NMAM).<http://www.cdc.gov/niosh/nmam> 2003.
- Rosen KG and Richardson G. Would removing indoor air particulates in children's environments reduce rate of absenteeism - A hypothesis. the Science of Total Environment 1999;234: 87-93
- Sekine Y and Nishimura A. Removal of formaldehyde from indoor air by passive type air-cleaning materials. Atmospheric Environment 2001;35: 2001-2007
- Yang W, Lee K and Chung M. Characterization of indoor air quality using multiple measurements of nitrogen dioxide. Indoor Air 2004;14: 105-111