

## 신축 주택의 톨루엔 발생량 모델을 이용한 건강위해성 평가

김영희 · 양원호<sup>†</sup> · 손부순\*

대구가톨릭대학교 산업보건학과, \*순천향대학교 환경보건학과

## Risk Assessment by Toluene Source Emission Model in Indoor Environments of New Houses

Young-Hee Kim · Won-Ho Yang<sup>†</sup> · Bu-Soon Son\*

Department of Occupational Health, Catholic University of Daegu

\*Department of Environmental Health Science, Soonchunhyang University

(Received August 20, 2006/Accepted October 25, 2006)

### ABSTRACT

Indoor air quality can be affected by indoor sources, ventilation, decay and outdoor levels. Understanding the effectiveness of indoor air quality control depends on knowledge of the characteristics of air pollutants in indoor air, especially their quantities and persistence, and the relevance of indoor sources to these factors. Toluene within new and established houses has been determined and factors significant to its presence have been identified. A total of 30 selected houses in Seoul, Asan and Daegu areas that were constructed within 4 years and over 4 years of construction were measured the concentration of toluene from July to September in 2004. Toluene emission decay of double-exponential model exhibited good fit of  $Y = 276.37e^{-1.21x}$  ( $R^2 = 0.34$ ,  $p = 0.06$ ) for 2 years and then  $Y = 51.54e^{-0.11x}$  ( $R^2 = 0.40$ ,  $p = 0.0$ ) from 23 years in new houses. In case of living in new houses, noncarcinogenic health effects of exposure to toluene was 1.38 of hazard quotient (HQ) comparing to toluene reference dose of 0.13 mg/kg-day.

**Keywords:** toluene, source strength, emission decay model, risk assessment

### I. 서 론

실내공기오염에 대한 문제의 발생 배경은 각종 산업 분야에서 에너지 절감 및 효율을 높이기 위해 밀폐화와 신축 건물의 사용자재 및 마감재 등에서 발생하는 유해 공기오염물질에 의해 실내공기의 질이 악화됨에 따라 발생된 것이다.<sup>1)</sup> 특히, 자연적으로 희석 가능한 외기의 대기오염과는 달리 실내공기는 한정된 공간에서 오염된 공기가 지속적으로 순환하면서 실내공기 오염 농도가 누적되어 실외 대기오염으로 인한 인체 영향보다 더 큰 건강영향을 유발할 수 있다.<sup>2)</sup> 미국 EPA의 보고에 의하면, 성인이 하루에 약 80% 이상을 실내 공간에서 생활하고 있는 것으로 조사되었고 한국인의 경우 환경부에서 전국 성인 833명을 대상으로 1일 활동

내역과 활동장소 및 실내에서의 거주시간을 조사한 결과에서 하루 중 약 87%의 시간을 실내에서 보내고 있는 것으로 보고되고 있다.<sup>3)</sup>

실내오염은 각종 실내공간에서 공기오염, 생활쓰레기, 소음, 악취 등의 각종 환경오염에 이르기까지 다양한 형태로 발생될 수 있으며 이 중에서도 실내공기오염은 대표적으로 인간의 건강까지 위협하고 있다.<sup>4)</sup> 실내공기 오염의 악화는 1970년대 선진 각 국에서는 사무실에서 일하는 직장인들에게 두통, 안질, 후두염, 알레르기성 질환, 어지러움 등을 야기 시켰으며 이것을 일명 빌딩증후군(Sick Building Syndrome, SBS) 또는 빌딩관련질병(Building Related Illness, BRI)이라 부른다. 아파트와 같은 공동주택의 새집증후군은 인구집중에 따른 주거형태의 변화로 각종 전자재 및 마감재에서 발생하는 폼알데히드(HCHO) 및 휘발성유기화합물질(VOCs)가 원인물질로 김 등이 보고한 것에 의하면 12개 단지 총 67세대에서 측정된 HCHO는 3개 단지가 환경기준치인  $210 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하였고, 톨루엔은 4개 단지로 최대

<sup>†</sup>Corresponding author : Department of Occupational Health, Catholic University of Daegu  
Tel: 82-53-850-3739, Fax: 82-53-850-3739  
E-mail : whyang@cu.ac.kr

**Table 1.** GC/MS condition

GC/MS condition	
Column	HP-FFAP 50 m (length) × 0.32 mm (Column ID) × 0.52 μm (film thickness)
Oven	60°C (3 min) to 90°C at 5°C/min to 250°C at 50°C/min (4 min)
Carrier	Helium (5 ml/min)
Detector	FID, 250°C
Injector	1 μl, 200°C

3,142.6 ug/m<sup>3</sup>으로 기준치를 3배 이상 초과하였다.<sup>5)</sup>

한편 Ott 등은 실내공기질의 영향 요인으로 실내 오염원 및 발생량, 실내 · 외 공기 환기량, 공기오염물질과 실내환경 내 건축자재와 가구 등과의 표면반응과 다른 공기오염물질 반응으로 보고하였고, 기타 실내환경의 습도, 온도, 압력, 기류 등 미확인 요인이 있다고 하였다.<sup>6)</sup> 따라서 각 영향요인은 실내공기질 평가 및 개선에 필수적이기 때문에 중요한 연구 분야라고 할 수 있다. 최근 국내의 새집증후군에 대한 관심과 인식은 매우 높지만 다양한 실내환경의 실내공기질 측정에 따른 평가 수준에 머물고 있는 실정이다.

본 연구에서는 준공 4년 이전의 주택을 주 대상으로 휘발성유기화합물 중 톨루엔(toluene)의 발생량을 다중 측정 방법에 의해 측정하고 그 결과를 이용하여 발생량 감소모델을 추정하였다. 감소모델의 실내환경 적용은 직접적으로 실내공기질 농도를 예측할 수 있으며, 이 결과는 신축 주택 거주에 따른 건강위해도를 평가하여 개선정도를 제시할 수 있도록 하는 것이다.

## II. 연구방법

### 1. 톨루엔 측정 및 분석

본 연구는 2004년 7월부터 2004년 9월까지 서울, 아산, 대구 3개 지역의 공동주택을 대상으로 하여 톨루엔(toluene)의 농도를 측정하였다. 각 지역에서 주택 건축완공 4년 이내 5주택 및 4년 이후 5주택을 선정하여 실내공간의 대표인 거실 내부 1곳과 실외 1곳을 선정하여 3일 간격으로 60일 동안 OVM badge 3500(3M)을 이용하여 톨루엔 농도를 측정하였다. 일반적으로 톨루엔을 포함한 VOCs의 측정은 펌프를 연결한 활성탄관법(charcoal tube method), 패시브법(passive sampler)과 tedlar bag 법 등이 있는데 본 연구에서는 서울, 대구, 아산에서 동시에 측정해야 하기 때문에 OVM 패시브 3500로 측정하였다. 분석은 일반 유기용제(활성탄관법)의 분석과 마찬가지로 각 샘플을 CS<sub>2</sub>로 탈착하여 GC/MS를 이용하여 분석하였다. 이용된 GC/

MS의 분석조건은 Table 1에 나타내었으며, 탈착효율은 1이었다.

### 2. 환기량 측정

환기량은 추적가스(tracer gas)를 이용하여 직접 측정할 수 있다.<sup>7)</sup> 이상적인 추적가스의 특성은 비반응성, 무독성이며, 저농도에서 측정 가능해야 한다. 본 연구에서는 CO<sub>2</sub> 표준가스를 이용하여 주택실내의 CO<sub>2</sub> 농도가 약 1500 ppm에 도달했을 때 CO<sub>2</sub> 표준가스를 정지시키고 5분마다 CO<sub>2</sub>를 농도를 측정(TSI Model 8760, USA)하여 주택의 CO<sub>2</sub> 농도가 약 600 ppm 정도에 이르면 측정을 중지하였다. CO<sub>2</sub> 표준가스 분사 전 및 분사 중에 Fan 3대를 이용하여 완전혼합(complete mixing) 상태로 하였으며 주택의 CO<sub>2</sub> 농도가 약 1500 ppm에 이르면 Fan은 정지시키고 약 5분 후에부터 CO<sub>2</sub> 농도를 측정하였고, 측정된 농도 값은 data-logger에 의해 자동으로 저장되도록 하였다. 환기량 측정은 추적가스 농도 감소법으로 회귀방법(regression method)을 이용하여 공기환기횟수(Air Changes per Hour, ACH)를 계산하였다.<sup>8)</sup> 각 주택에서 1회/2주 간격으로 측정하였다.

### 3. 톨루엔 발생량

실내환경에서 톨루엔 발생량은 Yang 등이 다중측정을 이용하여 추정한 방법을 이용하였다.<sup>9)</sup> 이 방법은 물질수지(mass balance)를 이용한 box model로 실내환경에서 오염물질의 생성은 물질보존의 법칙을 기본으로 하고 있다. 실내환경을 하나의 공간으로 간주하면 물질수지 식은 다음과 같다.

$$\frac{dC_i}{dt} = mIC_o + S - mIC_i - \frac{R}{V} \quad (1)$$

여기서, C<sub>i</sub>=indoor concentration(ppm), C<sub>o</sub>=outdoor concentration(ppm), I=air exchange rate(ACH: Air Changes per Hour, hr<sup>-1</sup>), S=source strength(cm<sup>3</sup>/hr · m<sup>3</sup>=ppm/hr), R=removal rate(cm<sup>3</sup>/hr), V=volume of the space(m<sup>3</sup>), t=time(hr) and m=mixing factor(0 ≤ m ≤ 1).

식 (1)에서 R은 감소상수(deposition constant, K=hr<sup>-1</sup>)와 실내환경에서 존재하는 오염물질의 질량(VC<sub>i</sub>=ug)으로 나타낼 수 있다.

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

식 (2)을 식 (1)에 대입하고 대상 실내공간에서 완전

혼합(completely mixed condition,  $m = 1$ )과 정상상태 ( $dC_i/dt = 0$ )를 가정하면, 식 (1)은 다음과 같이 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$C_{i(ss)} = \left( \frac{I}{I+K} \right) C_o + \left( \frac{S}{I+K} \right) \quad (3)$$

여기서,  $C_{i(ss)}$  = average steady-state indoor toluene concentration(ppm),  $S$  = average toluene generation rate ( $\text{cm}^3/\text{hr} \cdot \text{m}^3 = \text{ppm}/\text{hr}$ ) and  $C_o$  = average outdoor toluene concentration(ppm).

식 (3)에서 주택실내외의 톨루엔을 다중측정하면 최소사승직선을 이용한 일차 선형회귀식을 구할 수 있으며, 선형회귀식에서 기울기와 절편을 이용하여 발생량 (S)를 계산할 수 있다.

### III. 연구결과 및 고찰

#### 1. 주택특성

본 연구의 대상은 서울에서 10명, 아산 10명, 대구 10명 총 30명의 주택에서 수행되었다. 그리고 각 지역에서 5주택은 4년 이내의 주택이었으며, 5주택은 4년 이후의 주택이었다. 톨루엔의 농도측정은 참가자 30명 중에서 2명이 중도에서 불참하였고, 1주택은 측정과정

**Table 2.** General characteristics of houses investigated in this study

	Area			Total
	Seoul (n = 10)	Asan (n = 10)	Daegu (n = 10)	
Type of house				
Single house	0	1	1	2
Apartment	10	9	9	28
Attached garage	10	10	10	30
Inside smoker	0	1	3	4
Gas range	10	10	10	30
Gas water heater	10	10	10	30
Kerosene heater	0	0	0	0

중 측정기의 보관 상태가 불량하여 주택 총 27주택에서 농도분석을 하였다. 조사된 가족의 평균수는 3.7명이었고, 단독주택 2가구, 연립주택 3가구, 아파트는 25가구이었다. 실내벽의 주요 물질은 시멘트(30가구)였으며, 30주택 모두에서 벽면에 벽지를 하였다(Table 2).

#### 2. 실내 · 실외 톨루엔 농도

본 연구에서 측정된 톨루엔 농도결과를 Table 3에 나타내었다. 아산에서 건축 4년 이내 공동주택에서 측정된 톨루엔의 농도(실내:  $89.71 \pm 56.14$  ppb, 실외:

**Table 3.** Indoor and outdoor toluene concentrations

			Toluene (ppb)		
			Average $\pm$ S.D	GM	Range
Seoul (n = 9)	U 4 year	Indoor	30.50 $\pm$ 31.48	23.31	8.39~191.39
		Outdoor	30.47 $\pm$ 33.50	23.13	7.56~207.62
		I/O ratio	1.33 $\pm$ 1.05	N.A.	0.14~5.14
	O 4 year	Indoor	23.96 $\pm$ 10.54	21.57	3.86~50.71
		Outdoor	29.51 $\pm$ 19.14	24.36	3.31~109.10
		I/O ratio	0.98 $\pm$ 0.40	N.A.	0.22~1.93
Asan (n = 9)	U 4 year	Indoor	89.71 $\pm$ 56.14	67.93	9.18~213.18
		Outdoor	83.95 $\pm$ 62.96	60.34	5.73~338.37
		I/O ratio	1.34 $\pm$ 1.09	N.A.	0.16~8.08
	O 4 year	Indoor	21.20 $\pm$ 21.95	16.17	2.64~152.14
		Outdoor	31.07 $\pm$ 25.12	24.34	7.73~141.95
		I/O ratio	0.79 $\pm$ 0.46	N.A.	0.10~2.12
Daegu (n = 9)	U 4 year	Indoor	11.36 $\pm$ 4.11	10.58	3.29~23.05
		Outdoor	10.67 $\pm$ 4.65	9.60	1.75~24.43
		I/O ratio	1.24 $\pm$ 0.82	N.A.	0.21~6.62
	O 4 year	Indoor	14.42 $\pm$ 9.48	11.58	1.99~42.79
		Outdoor	11.11 $\pm$ 5.80	9.65	1.72~31.34
		I/O ratio	1.36 $\pm$ 0.79	N.A.	0.39~4.49

**Table 4.** Mean ventilation rate of houses investigated according to areas

	ACH (1/hr, M±S.D.)	Range
Seoul	1.52 ± 0.92	0.71~3.68
Asan	0.98 ± 0.62	0.28~1.35
Daegu	0.71 ± 0.50	0.43~1.52
Total	1.09 ± 0.75	0.28~3.68

83.95±62.96 ppb)는 서울(실내: 30.50±31.48, 실외: 30.47±33.50)과 대구(실내: 11.36±4.11, 실외:10.67±4.65)에 비해 상대적으로 실내 및 실외 농도가 높았고, 중소 도시로 분류될 수 있는 아산에서 실내 및 실외의 톨루엔 농도값이 서울과 대구에 비해 상대적으로 높은 이유는 참여 대상자의 주택이 천안에 거주하는 사람도 있었고, 특히 도로변 근접지역에 위치하는 주택과 서울과 대구에 비해 3주택이 건축 1년 이내였기 때문에 해석된다. 이것은 실내공기질의 영향 요인 중 발생원뿐만 아니라 실외공기 유입에 의한 환기가 중요성을 나타내는 것이다. 또한, 실내공기오염의 중요한 점은 중소도시며 실외공기가 비교적 깨끗할 것으로 고려되는 지역에서도 신축건물이며 도로변 인접 지역의 주택은 대도시인 서울보다 실내공기질이 더욱 악화될 수 있음을 나타내고 있다.

**Table 5.** Estimated deposition source strength of toluene

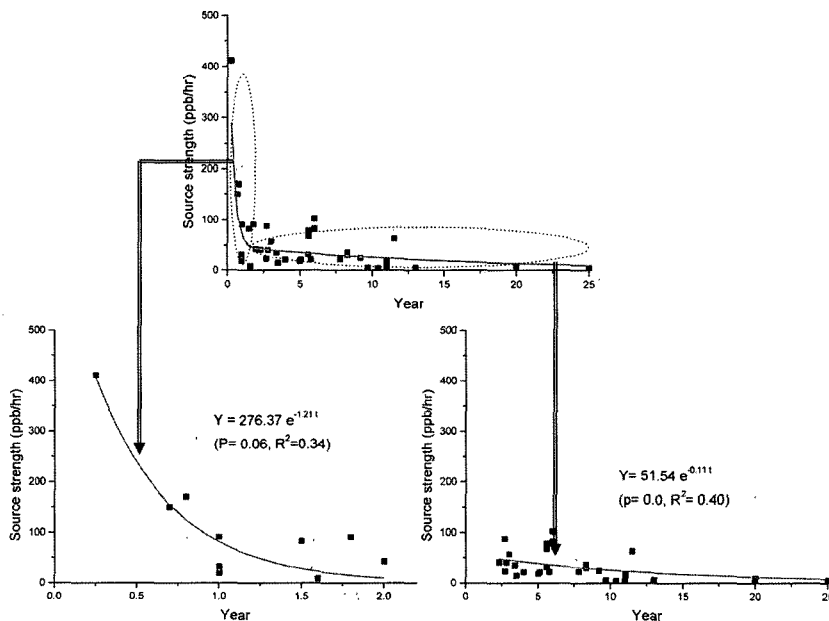
	Source strength (S, ppb/h)	
	M±S.D.	Range
Seoul	40.92 ± 24.24	21.89~81.66
Asan	105.22 ± 128.66	7.28~411.45
Daegu	18.46 ± 12.55	4.37~40.77
Total	58.78 ± 88.7	4.37~411.45

**3. 환기량 측정**

주택의 환기량 측정은 방문시 주택의 현 상태에서 측정 계산되었다. 측정된 환기량은 총 8회 수행되었으며 그 결과를 살펴보면, 평균 환기량(ACH)은 서울 1.51±0.92 ACH(1/hr), 아산 0.98±0.62 ACH(1/hr), 대구 0.71±0.50 ACH(1/hr) 나타났다(Table 4).

**4. 톨루엔 발생량 모델**

실내·실외에서 측정된 톨루엔 농도와 환기량 측정 결과를 식 (3)에 적용하면, 톨루엔의 발생강도(S, ppb/h)를 추정할 수 있다(Table 5). 주택 실내환경에서 톨루엔의 발생량은 58.78±88.68 ppb/h로 추정 계산되었다. 본 결과에서 발생강도의 경우 높은 표준편차 값을 보이고 있으며, 주택 건축년 수를 기준으로 추정한 발생강도 관계를 Fig. 1에 나타내었다. 일반적으로 전자재 등에서 발생하는 VOCs는 일차반응식(first-order equa-



**Fig. 1.** Exponential decay of toluene emission according to house age.

tion)으로 감소(decay)되는 것으로 보고되고 있다.<sup>10)</sup> 본 연구에서도 Curve-fit에 의한 결과는 일차반응식(first-order emission decay)으로 감소하는 경향을 보였다 (Fig. 1). 본 연구에서는 건자재에서 발생하는 톨루엔을 포함한 VOCs는 이중 지수감소(double-exponential decay) 하는 것으로 보고한 Brown의 결과를 토대로, 2년 이전 주택과 2년 이후 주택 2가지로 구분하여 각각 Curve-fit를 적용하였다.<sup>11)</sup> 이 결과에 의하면, 2년 이내의 주택은  $Y = 276.37e^{-1.21x}$  ( $R^2 = 0.34$ ,  $p = 0.06$ )을 보였고, 2년 이후의 주택은  $Y = 51.54e^{-0.11x}$  ( $R^2 = 0.40$ ,  $p = 0.0$ )로 감소하는 것으로 추정되었다.

### 5. 톨루엔 발생모델을 이용한 위해성평가

신축 공동주택의 톨루엔 발생량에 대한 이중지수감소 모델을 이용한 위해성 평가를 하였다. Fig. 1에서 2년간 지수발생 모델식  $Y = 276.37e^{-1.21x}$ 의 면적은 208.1 ppb/hr×year, 3년에서 25년까지의 지수발생 모델식  $Y = 51.54e^{-0.11x}$ 의 면적은 346.1 ppb/hr×year로 계산되었다. 이 결과를 체중 60 kg, 호흡율 20 m<sup>3</sup>/day, 평균수명 70년으로 가정하여 비발암성 위해도 결정에 이용되는 일일평균용량(average daily doses, ADDs)로 나타낼 수 있다.<sup>12,13)</sup> 실내공기질의 평생 동안 기준노출량은 미국 EPA의 IRIS(integrated risk information system)에서 제공하는 톨루엔의 흡입 참고용량 0.40 mg/m<sup>3</sup>이다.<sup>14)</sup> 본 연구에서는 참고용량의 단위를 전환하여 기준노출량 0.13 mg/kg-day로 산출하였다.

신축 공동주택 입주 후 2년 및 3년부터 68년까지 고려한 ADD 값은 0.18 mg/kg-day이었으며, 신축 공동주택 3년부터 70년까지의 ADD 값은 0.05 mg/kg-day이었다. 이 결과를 비발암성의 위험값(Hazard Quotient, HQ)에 적용하여 기준노출량인 RfD와 비교함으로써 '1'을 초과하는 경우에는 유해 건강영향이 발생할 가능성이 있음을 제시한다(식 4). 신축 공동주택 입주부터 70년간 거주한 경우 ADD 값은 신축주택이 아닌 경우에 비해 3.6배 높았으며, HQ 값은 1.38를 나타내 신축 주택 거주에 따른 유해 건강영향을 야기할 수 있음을 알 수 있다.

$$HQ = \frac{ADD (mg/kg-day)}{Reference\ dose (mg/kg-day)} \quad (4)$$

### 4. 결 론

최근 국내에서는 새집증후군에 대한 관심과 인식은 매우 높지만 단지 실내환경의 실내공기질 측정에 따른 평가 수준에 머물고 있는 실정이다. 실내공기질은 실내

발생원 및 발생량, 환기, 실외 대기농도, 온도, 기류, 습도 등 다양한 인자에 영향을 받는다. 따라서 각 영향 인자에 대한 측정 및 평가는 실내공기질 관리 및 개선에 핵심이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 준공 2년 이전의 주택을 주 대상으로 휘발성유기화합물 중 톨루엔의 발생량을 다중측정 방법에 의해 측정하고 그 결과를 이용하여 신축 주택에서 톨루엔 발생은 이중지수 모델(double-exponential decay)을 따르는 것으로 나타났다. 발생량 모델의 실내환경 적용은 직접적으로 실내공기질 농도를 예측할 수 있었으며, 신축 주택 거주에 따른 건강위해를 계산한 결과 위험값(HQ)이 1.38이었으며 이것은 신축 주택이 아닌 경우에 비해 3.6배 높은 값이었다.

### 참고문헌

- 이철민, 김윤신, 이태형, 김종렬, 김중호 : 확률론적 모의실험을 이용한 공기청정기의 실내공기중 PM10과 NO2 제거 효율에 관한 연구. 한국환경보건학회지, **30**(3), 221-229, 2004.
- Jones, A. P. : Indoor air quality and health. *Atmospheric Environment*, **33**, 4535-4564, 1999.
- 환경부 : 실내공간 공기오염특성 및 관리방안, 2001.
- Henry, C. J., Fishbein, L., Meggs, W. J., Ashford, N. A., Schulte, P. A., Anderson, H., Osborne, J. S. and Sepkovic, D. W. : Approaches for assessing health risks from complex mixtures in indoor air: A panel overview. *Environmental Health Perspectives*, **95**, 135-143, 1991.
- 김남진, 이지영, 이호찬, 서광석, 이석보, 전재식, 김민영 : 공동주택의 새집증후군 유발물질 실태조사. 한국대기환경학회 2006 춘계학술대회 논문집, 183-184, 2006.
- Ott, W., Switzer, P. and Robinson, J. : Particle concentrations inside a tavern before and after prohibition of smoking: evaluating the performance of an indoor air quality model. *Journal of the Air & Waste Management Association*, **46**, 1120-1134, 1994.
- Nazaroff, W. W. and Cass, G. R. : Mathematical modeling of chemically reactive pollutants in indoor air. *Environmental Science and Technology*, **20**, 924-934, 1986.
- 양원호, 배현주, 이기영, 정문호 : 측정시간에 따른 거주지역 환기량 계산 오류에 관한 연구. 한국환경위생학회지, **26**(3), 50-54, 2000.
- Yang, W., Lee, K. and Chung, M. : Characterization of indoor air quality using multiple measurements of nitrogen dioxide. *Indoor Air*, **14**, 105-111, 2004.
- Ellacott, M. V. and Reed, S. : Development of robust indoor air quality models for the estimation of volatile organic compound concentrations in buildings. *Indoor Built Environment*, **8**, 345-360, 1999.
- Brown, S. K. : Volatile organic pollutants in new and

- established buildings in Melbourne, Australia. *Indoor Air*, **12**, 55-63, 2002.
12. Hoddinott, K. B. and Lee, A. P. : The use of environmental risk assessment methodologies for an indoor air quality investigation. *Chemosphere*, **41**, 77-84, 2000.
  13. Naugle, E. F. and Plerson, T. K. : A framework for risk characterization of environmental pollutants. *Journal of the Air & Waste Management Association*, **41**(10), 1298-1307, 1991.
  14. US EPA : <http://www.epa.gov/IRIS>