

지하수내 BTEX에 의한 실내오염시 위해도 평가 Risk Assessment of Indoor Pollution by BTEX Released from Groundwater

유동한* · 이한수 · 김상준¹⁾ · 양지원¹⁾
한국원자력연구소, ¹⁾한국과학기술원 생명화학공학과
(2002년 4월 11일 접수, 2002년 8월 16일 채택)

Donghan Yu*, Han Soo Lee, Sang-Joon Kim¹⁾ and Ji-Won Yang¹⁾
Korea Atomic Energy Research Institute,
¹⁾Department of Chemical and Biomolecular Engineering, KAIST
(Received 11 April 2002, accepted 16 August 2002)

Abstract

Benzene, Ethyl-benzene, Toluene and Xylene (BTEX) can be released to a groundwater in case of the oil leakage from underground storage tank of a gas station. These chemicals are found to contribute to the total inhalation risk from contaminated indoor air. This study presents the assessment of a human exposure to such chemicals released from the groundwater into indoor air. At first, a 2-compartment model is developed to describe the transfer and distribution of the chemicals released from groundwater in a house through showering, washing clothes, and flushing toilets. The model is used to estimate a daily human exposure through inhalation of such BTEX for adults based on two sets of exposure scenarios. Finally, a sensitivity analysis is used to identify important parameters. The results obtained from the study would help to increase the understanding of risk assessment issues associated with the indoor pollution by BTEX released from contaminated groundwater.

Key words : indoor pollution, risk assessment, BTEX, exposure assessment

1. 서 론

최근, 주유소와 저유소 등 유류저장시설에서의 지하저장 탱크(UST)에서 발생하는 누유로 인해 토양과 지하수의 오염이 심각하게 우려되고 있다. 미국의 경우만 볼 때, 약 100만개 정도로 예측되는 이러

한 석유저장탱크 중 약 20만개 정도에서 누유가 발생가능하며 이는 주변토양을 오염시키는 것으로 보고되고 있다(Kao and Wang, 2000). 국내의 경우, 1만개의 주유소를 포함하여 총 1만 8천여 곳의 유류저장시설이 운영되고 있다고 보고되며 이들 시설에 대한 누유여부에 대한 조사는 아직 초기단계를 넘어서지 못한 실정이다. 그러나 국내 저장시설의 노후화와 사후 안전시설의 빈약성으로 미국보다 다소 높은 비율로 유출이 발생되고 있다고 예상된다. 특

* Corresponding author
Tel : 042-868-8380, E-mail : dhyu@kaeri.re.kr

히 주유소의 경우에는 주민거주지역에 가깝게 위치한 관계로 유류누출에 의한 오염물질의 노출로 인해 건강상의 위해를 초래할 수 있다(Choi *et al.*, 1999).

이러한 저장시설의 누유로 배출되는 오염물질중 Benzene, Ethyl-benzene, Toluene 및 Xylene (이하 BTEX)은 다른 물질보다 상대적으로 수용해성이 크므로 유류누출지역의 지하수오염의 대상물질이 되어왔다. BTEX의 일반적인 인체노출경로는 토양층으로부터 오염된 지하수의 직접적인 섭취 또는 오염된 물을 농업용수로 사용하여 발생하는 토양오염 등에 의한 것을 꼽을 수 있다(Haddad *et al.*, 1999). BTEX 중에서 가솔린의 필수적인 구성원소인 Benzene은 장기간 호흡을 통해 노출되는 경우, 암을 유발시키는 발암물질로 p-benzoquinone, hydroquinone 그리고 mucoaldehyde와 같은 벤젠대사물이 인체세포를 자극하여 암을 유발하는 것으로 알려져 있다(Nakayama, 2000). Toluene은 발암물질은 아니나 MCL (Maximum Contaminated Level) 이상의 농도로 장기간 노출시에 뚜렷한 신경교란이 일어나 경련, 손떨림, 말하기·듣기능력 손상 및 시력과 기억력 감퇴가 일어날 수 있으며, Ethyl-benzene 역시 장기간 노출의 경우, 나쁜합과 피로, 두통을 유발시키고 마지막으로 Xylene은 인체노출후 중앙신경체계, 간 그리고 신장에 손상을 준다고 알려져 있다(USEPA, 2000).

이렇게 오염된 지하수를 직접 인체가 섭취하지 않더라도 이러한 지하수를 생활용수로 사용하는 경우, 지하수로부터 휘발된 BTEX가 실내공기와 섞여 실내에서 인체가 이를 흡입하여 건강상 문제가 발생할 수 있다. 대부분의 현대인들은 하루생활 중 80% 이상을 실내에서 생활하며 특히 가정주부 그리고 노약자들은 거의 90% 이상을 실내에서 생활하고 있는 것으로 보고되고 있다(Spangle and Dockery, 1981). 최근 지표수의 부족으로 지하수로 취수하여 생활용수로 사용하는 경우가 늘어나는 추세를 감안할 때, 오염된 지하수의 BTEX가 실내공기로 휘발하여 발생하는 실내오염에 의한 인체위해평가가 필요하다. 예상되는 이러한 문제해결을 위해 이러한 BTEX에 의해 오염된 지하수를 사용하여 발생하는 실내오염을 국내실정에 맞게 정량적으로 평가하는 것이 필요하다.

이 경우 기존연구에서는 실내에서의 BTEX농도를 측정하는 실험을 수행, 이를 바탕으로 하여 실내오염을 평가하는 것이 일반적이다. 그러나, 본 연구의 목적은 실내의 BTEX의 이동 및 분포를 정량적으로 평가하기 위한 수학적 구역모델(mathematically-based compartment model)을 개발하고 이를 활용하여 인체내 축적되는 이들의 양을 예측하고자 하는 것이다. 이러한 수학적 구역모델은 미국의 McKone(1987)에 의해 미국주택을 바탕으로 한 3-구역모델을 개발하여 chloroform, ethylene dibromide, methylchloroform 등 휘발성 유기화합물의 실내 이동 및 분포를 평가하는데 효과적으로 사용된다. 미국주택구조를 바탕으로 한 3-구역모델에서는 실내를 '샤워실', '화장실' 및 '그 밖의 구역' 등으로 나누어 모델을 개발하였으나 국내주택의 구조는 '샤워실'과 '화장실'의 경계가 없는 실정을 고려하여야 한다. 따라서, 본 연구에서는 우선 국내주택구조에 알맞게 보다 단순화시킨 2-구역모델을 개발하고 국내거주형태에 맞는 입력인자 값들을 사용하여 지하수로부터 실내로 휘발하여 실내오염을 일으키는 BTEX의 시간에 따른 농도분포를 예측하였다. 이러한 예측된 BTEX의 실내오염으로부터 주택에 거주하는 인체가 호흡으로 노출되어 BTEX가 체내에 축적하는 양(internal dose)을 정량적으로 평가하여 보았다. 마지막으로 이러한 체내축적량을 바탕으로 하여 BTEX의 발암 및 비발암 위해도를 계산하여 보았다. 본 연구의 결과는 추후 오염된 지하수내 BTEX에 의한 실내오염시 인체위해평가에 대한 기본적인 자료를 제공하여 인체노출저감을 위한 대책을 마련하는데 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 연구방법

2.1 지하수내 BTEX 농도 결정

본 연구에서는 대전지역을 대상으로 이미 저자에 의해 수행되었던 기존 연구(Choi *et al.*, 1999)의 결과를 바탕으로 하여 오염된 지하수내 존재하는 BTEX의 농도를 결정하려고 한다. 기존연구에서는 주유소에서 토양으로 누출된 BTEX의 이동을 정량적으로 평가한 수학적 모델을 개발하고 이런 모델

내 입력인자들의 불확실성을 포함하여 최종적으로 예상되는 지하수내 BTEX의 농도분포를 계산하였다.

본 연구는 인체위해를 보다 보수적인 관점에서 평가하기 위해 기존연구에서 예측된 지하수의 BTEX 농도분포의 상한치인 95 백분위수 (95th percentile)를 기준으로 하여 Benzene, Ethyl-benzene, Toluene 및 Xylene 농도값을 각각 0.00150, 0.0107, 0.0141, 0.0690 mg/L로 가정하였다.

2.2 실내오염 평가를 위한 2-구역 모델개발

BTEX를 함유된 오염지하수를 생활용수로 사용할 때 휘발성이 있는 BTEX가 실내공기로 휘발, 이동하는 과정을 수학적으로 모의하기 위해 2-구역 모델 (2-compartment model)을 개발하였다. 라돈의 실내오염평가를 위해 저자들이 사용되었던 3-구역 모델 (Yu et al., 2001)은 이 경우에도 적용가능하나, 본 연구에서는 ‘샤워실’과 ‘화장실’을 구분하는 경계가 없다는 국내실정을 고려하여 국내실정에 맞도록 보다 간단한 2-구역 모델을 개발하였다. 그림 1과 같이 실내를 두 구역(샤워실, ‘그 밖의 집안’)으로 나누고 각 구역에서 BTEX의 물질수지 방정식은 아래와 같이 수립하였다.

$$V_s \frac{dC_s}{dt} = Q_s(t) + q_{as}C_a(t) - (q_{so} + q_{sa})C_s(t) \quad (1)$$

$$V_a \frac{dC_a}{dt} = Q_a(t) + q_{sa}C_s(t) - (q_{ao} + q_{as})C_a(t) \quad (2)$$

여기서 C (mg/L)는 실내공기중에 존재하는 화학물질의 농도를, V (L)는 구역의 부피를, 그리고 R은 각 구역에서 공기의 체류시간을 뜻한다. 사용된 아래첨자인 s, a, o는 각각 ‘샤워실’ (shower)과 ‘그 밖

의 집안’ (the remainder of the house) 그리고 실외 (outdoor)를 의미한다. 그리고 q는 공기환기율을 의미하며 사용된 아래첨자는 이동이 시작하는 구역에서 도달하는 구역을 의미한다. 이러한 공기 환기율은 관계식 (3), (4), (5), (6)으로부터 구해진다.

$$\frac{V_a}{R_s} = q_{ao} + q_{as} \quad (3)$$

$$\frac{V_s}{R_s} = q_{so} + q_{sa} \quad (4)$$

$$q_{so} = f_o q_{as} \quad (5)$$

$$q_{sa} = q_{as} - q_{so} \quad (6)$$

Q (mg/h)는 BTEX의 발생원으로 식 (7)과 같이 정의되며 I_i 는 각 활동에서 쓰이는 물의 양, Φ_i 는 물에서 실내공기 중으로 이동하는 전달계수 (transfer efficiency), τ_i^o 는 용수를 사용하기 시작하는 시간, 그리고 τ_i^* 는 사용을 끝내는 시간을 의미한다. 그 밖의 인자들에 대한 설명은 저자들의 논문 (Yu et al., 2001)을 참조하기 바란다.

$$Q_i(t) = \frac{I_i \phi_i H(t, \tau_i^o, \tau_i^*)}{\tau_i^* - \tau_i^o} C_w \quad (7)$$

지하수를 생활용수로 사용하는 시나리오는 기본적으로 하루 세 번의 식사 준비를 위한 용수 (kitchen and sinks)와 세면시 사용 (face washing), 오전 중의 세탁 (laundry)과 오후 한번의 청소 (cleaning) 그리고 두 차례의 샤워 및 목욕 (shower)과 24시간 내내 변기에서의 용수 (toilet)사용을 가정하였다.

표 1에서는 본 연구에서 사용된 입력인자 값들을 정리하였다. 우선, 각 구역의 부피는 국내에서 건설되고 있는 가장 전형적인 32평형 아파트를 기준으로 하여 산정되었다. 또한, 각 용도별 물 사용량은

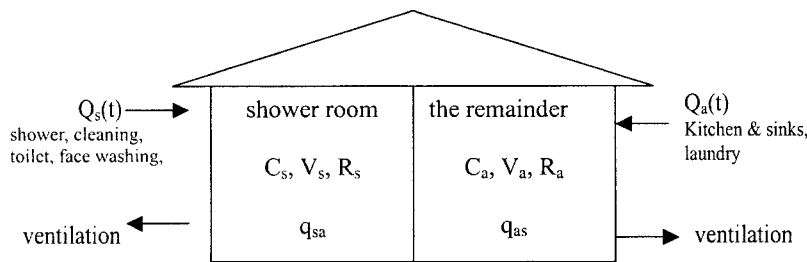


Fig. 1. A two-compartment model for simulating the transfer of BTEX from groundwater to indoor air.

Table 1. Summary of parameters used to calculated indoor air concentrations of BTEX. (Attributable to water use by a family of four)

	Description	Representative value	Likely range
V_s	Volume of shower room	18,900 L	
R_s	Residence time of air in shower stall	30 min	20 ~ 60
V_a	Volume of remaining house	248,000 L	
R_a	Residence time of air in household air	120 min	30 ~ 240
f_o	Fraction of air leaving bathroom exhausted outdoors	0.1	0 ~ 0.6
I_s	Water used in shower room	206.8 L	
I_a	Water for other household uses	620.4 L	
T_{shr}	Duration of shower per individual	10 min	5 ~ 20
τ_s^o, τ_s^*	Time interval when shower water is used	7.8; 19.20	
τ_t^o, τ_t^*	Time interval when toilet water is used	0, 24	
τ_c^o, τ_c^*	Time interval when cleaning water is used	14, 15	
τ_f^o, τ_f^*	Time interval when face washing water is used	7:30, 8:30; 12:30, 13:30; 18:30, 19:30	
τ_l^o, τ_l^*	Time interval when laundry water is used	10, 11:30	
τ_k^o, τ_k^*	Time interval when kitchen and sinks water is used	7.8; 12.13; 18.19	0.3 ~ 0.7

국내 자료인 전체 물 사용량 (Han, 1995)을 국내 4인 가족을 기준으로 하여 Prichard and Gessell (1981)이 조사한 용도별 용수사용 비율로 나누어 계산하였다. 그리고 실내에서 이루어지는 여러 활동(세면, 화장실사용, 세탁 등등)시간은 전형적인 실내생활 패턴을 고려하여 결정하였다.

2.3 전달효율 (transfer efficiency)의 계산

전달효율의 계산방법은 기본적으로 McKone (1987)의 방식을 따랐으며 기액 (gas/liquid) 경계에서의 전달효율은 전체 질량전달계수, K와 비례한다는 가정하에서 식 (8)과 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi_i^j = \Phi_i^{Rn} \frac{K(j)}{K(Rn)} = \Phi_i^{Rn} \frac{\left[\frac{2.5}{D_i^{2/3}} + \frac{RT}{D_a^{2/3}H} \right]_{Rn}}{\left[\frac{2.5}{D_i^{2/3}} + \frac{RT}{D_a^{2/3}H} \right]_j} \quad (8)$$

여기서 Φ_i^j 는 무단위 계수이며 i의 용수사용에서 j 물질의 전달효율을 말하며 Φ_i^{Rn} 은 i 용수사용시 Radon의 전달효율을 뜻한다. H는 헨리상수, R은 기체상수 (0.0624 Torr m³/mol · K), T는 온도 (K)를 말한다.

$$K = \beta \left[\frac{2.5}{D_i^{2/3}} + \frac{RT}{D_a^{2/3}H} \right]^{-1} \quad (9)$$

여기서 β 는 물질성질에는 독립적으로 물리적인

상황에 좌우되는 무단위 상수이며, D_i (m²/s)은 물에서의 확산계수 D_a (m²/s)는 공기에서의 확산계수를 말한다.

$$D_{AB} = 0.0018583 \frac{\sqrt{T^3 \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)}}{P \sigma_{AB}^2 \Omega_{D, AB}} \quad (10)$$

$$\sigma_{AB} = \frac{1}{2} (\sigma_A + \sigma_B) \quad (11-a)$$

$$\epsilon_{AB} = \sqrt{\epsilon_A \epsilon_B} \quad (11-b)$$

$$\epsilon/\kappa = 0.77T_C, \sigma = 0.84V, \text{ 혹은 } 2.44 \left[\frac{T_C}{P_C} \right]^{1/3} \quad (11-c)$$

$$\Omega_{D, AB} = 7.4 \times 10^{-8} \frac{(\psi_B M_B)^{1/2} T}{\mu \tilde{V}_A^{0.6}} \quad (12)$$

여기서 \tilde{V}_A 는 용질 A의 보통의 끓는점에서 액체 상태에서의 몰랄 부피이고 단위는 [cm³ g-mol⁻¹]이며 Les Bas 방법을 이용하여 계산하였다. μ 는 용액의 점도를 말하며 20°C의 물에서는 1.0019의 값을 갖는다. ψ_B 는 관련 파라미터이며 물에 대해서는 2.6의 값을 갖는다. M_B 는 물의 분자량 18이고 T는 293°K이다.

식 (10)과 (12)를 이용해 낮은 밀도의 가스상에서의 BTEX의 확산계수 (diffusion coefficient)를 20°C의 공기와 물에 대해서 계산하여 표 2에 정리하였다 (Bird et al., 1960). 이로부터 각 사용용수에 따른 전달효율을 라돈의 결과 (Prichard and Gesell, 1981)

Table 2. Mass-transfer properties for radon and BTEX at 20°C.

Compound	Diffusion coefficient		Henry's law constant, Torr-m ³ /mol	K (j)/K (Rn)
	in water, ^a m ² /s	in air, ^a m ² /s		
Radon	1.4 × 10 ⁻⁹	2.0 × 10 ⁻⁵	70	1.0
Benzene	9.6 × 10 ⁻¹⁰	10.5 × 10 ⁻⁶	4.2	0.78
Toluene	8.5 × 10 ⁻¹⁰	9.2 × 10 ⁻⁶	4.7	0.72
Ethylbenzene	7.6 × 10 ⁻¹⁰	8.2 × 10 ⁻⁶	6.3	0.66
Xylene	7.6 × 10 ⁻¹⁰	8.2 × 10 ⁻⁶	4.5	0.66

^aCalculated by property-estimation methods described in R.B. Bird *et al.*²⁾

Table 3. BTEX transfer efficiency from air to water with water consumption by category of use.

	Transfer efficiency, % ^a					Water consumption daily use, L/family of four per day ^{b)}
	Radon ^{a)}	Benzene	Toluene	Ethylbenzene	Xylene	
Toilet	30	23	22	20	20	295
Showers	63	49	46	38	38	227.1
Face washing	-	70	65	60	60	73.2
Laundry	90	70	65	60	60	79.6
Kitchen and sinks	30	23	22	20	20	127.2
Cleaning	90	70	65	60	60	24.2

^{a)} Calculated relatively from transfer efficiency of Radon

^{b)} Estimated according to the standard American family

를 이용하여 상대적으로 계산해 표 3에 정리하였다.

2. 4 인체노출량 및 위해도평가

개발된 2구역 모델에서 예측된 실내공기내에서의 BTEX의 농도로부터 실내에 거주하는 인체의 노출량은 아래와 같은 식을 통해 계산할 수 있다.

$$D = \frac{\alpha}{BW} \int_0^{24} [OF_s(t)C_s(t) + OF_a(t)C_a(t)]BR(t)dt \quad (12)$$

여기서 D = 개인에 대한 하루동안의 체내축적량 (mg/kg · d), α = 흡입된 BTEX 중 체내로 흡수되는 비율 (단위 없음), BW = 몸무게, kg (남성: 65.42 kg, 여성: 54.66 kg) (한국표준과학연구원, 1992), OF_s(t) = 개인당 t시간에 샤워실의 점유율 (단위 없음), OF_a(t) = 개인당 t시간에 '그 밖의 집안'의 점유율 (단위 없음), BR(t) = t시간의 호흡량 (L/hr) (남성 (활동/비활동): 796.2/442.8, 여성: 529.2/330.6)을 의미한다.

본 연구에서 BTEX의 실내오염으로부터 인체노출을 평가하기 위해 사용한 노출시나리오는 기본적으로 기준 경우 (base case)와 최악 경우 (worst case) 두 가지이다.

기준 경우에서 남성의 경우 7시에서 8시 사이에 10분간의 샤워와 10분간의 화장실을 이용하며 추가적으로 아침에 세면 및 양치를 한다고 정하였다. 또한 낮 시간에는 대부분 외근한다는 점을 감안하여 집안에서의 노출을 생략하였으며 그 시간은 8시에 외근하고 18시에 퇴근한다고 하였다. 그 이후 한번의 세면이 있으며 23시에 취침한다. 따라서 8시에서 18시까지의 노출은 생략한다. 여성의 기준 경우는 외출은 없으며 남성의 경우에 추가적으로 12시 30분에 10분간의 세면과 14시에 15분간 청소를 한다고 가정하였다. 이 때 체내흡수율(α)은 불확실성이 큰 인자로 기존연구(Yu *et al.*, 2001)에서처럼 이 경우는 50%로 가정하였다. 최악의 경우에는 남녀 모두 외출하지 않으며 모든 용수사용 시간은 1.5배로 정하였다. 이때 남성의 경우에 하루 중의 세면(face washing)의 횟수와 시간대는 여성의 경우와 동일하게 하였으며 다만 세탁과 청소와 같은 가사일은 생략하였다. 이 경우는 보다 보수적인 관점에서 평가하기 위해 체내흡수율을 100%로 가정하였다.

BTEX로 오염된 지하수의 사용에 따른 실내공기오염시 호흡노출에 의한 인체 발암위해도와 비발암위해도평가는 앞서 언급한 2 구역모델에 의해 예측된 실내농도분포와 인체노출시나리오에 따라 계산되는 체내축적량 (internal dose)를 바탕으로 하여 평가할 수 있다.

이 때 Benzene의 발암위해도는 하루동안 호흡노출에 의한 체내축적량에 발암유발인자 (cancer potency factor)을 곱하여 계산할 수 있다. 한편, Ethylbenzene, Toluene 및 Xylene 등 비발암물질에 대해서는 아래와 같은 위해도지표 (Hazard Index)를 평가하기로 한다.

$$H.I. = \frac{MII}{RfD} \quad (13)$$

여기서 MII는 Maximum Inhalation Intake로 앞서 소개한 모델들을 사용해 계산할 수 있으며, RfD는 Reference Dose를 의미한다.

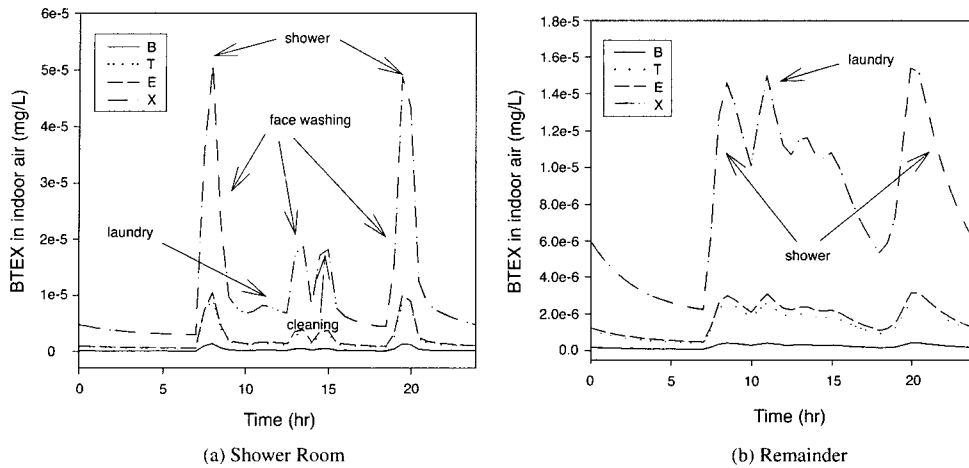


Fig. 2. Esitamed indoor concentration of BTEX from the two compartment model for base case.

3. 결과 및 고찰

3.1 BTEX의 실내농도변화

그림 2는 앞서 소개한 2 구역모델로 모의한 하루 중 각 구역에서의 BTEX 농도변화를 보여주고 있다. 각 화학물질에 대해 동일한 농도변화 패턴을 보이고 있으며 실내공기 중 BTEX 농도에 큰 영향을 주고 있는 것은 샤워임을 알 수 있다. 그리고, '그 밖의 집안'에서 유일한 발생원인 세탁은 사용하는 물의 양이 상대적으로 작지만 해당구역에서 뚜렷한 실내농도상승을 일으키고 있다. '샤워실'에서 최고 실내오염농도를 보이는 시간은 아침, 저녁 샤워가 끝나는 오전 8시와 오후 8시이다. '그 밖의 집안'에서는 실내농도의 변화가 '샤워실'보다 완만하게 나타났는데 이는 대부분의 BTEX가 '샤워실'에서 발생하여 '그 밖의 집안'으로 이동하고 그 사이에 실내공기가 외부공기의 유입으로 희석되는 효과가 발생하기 때문이다.

그림 3과 4는 기준경우에 대해 각각 남녀별 BTEX의 시간당 개인농도(personal concentration)를 보여주고 있다. 오전 7시에 샤워와 세면 등으로 '샤워실'을 이용하므로 이 구역에서 높은 농도의 BTEX에 인체노출이 발생하며, 이 밖에도 세면(face washing) 및 청소(cleaning) 등이 주요 인체노출 원인이 되고 있음을 알 수 있었다. 남성의 경우 오전 8시에

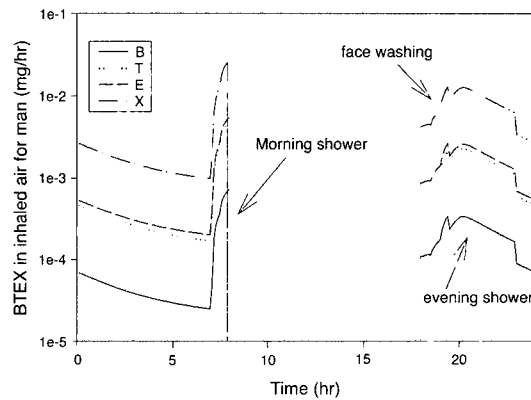


Fig. 3. Personal air concentration profiles of BTEX for man for the base case.

BTEX 순서로 각각 최대 7.31×10^{-4} , 4.90×10^{-3} , 5.49×10^{-3} , 2.69×10^{-2} mg/hr, 여성의 경우에는 같은 시간대에 각각 3.28×10^{-4} , 2.20×10^{-3} , 2.48×10^{-3} , 1.21×10^{-2} mg/hr로 호흡에 의해 체내흡입이 일어나는데, 여성의 경우 상대적 호흡량이 남성보다 작으므로 이렇게 시간당 체내흡입률이 낮게 나타나게 된다.

3.2 Benzene의 체내축적량

Benzene의 경우 기준경우에 따른 남녀별 체내축적량의 변화는 그림 5와 표 4에서 보여주고 있다.

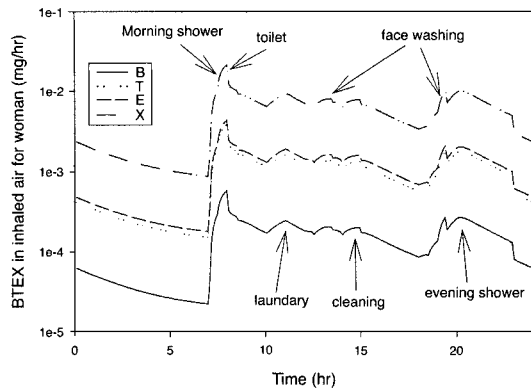


Fig. 4. Personal air concentration profiles of BTEX for woman for the base case.

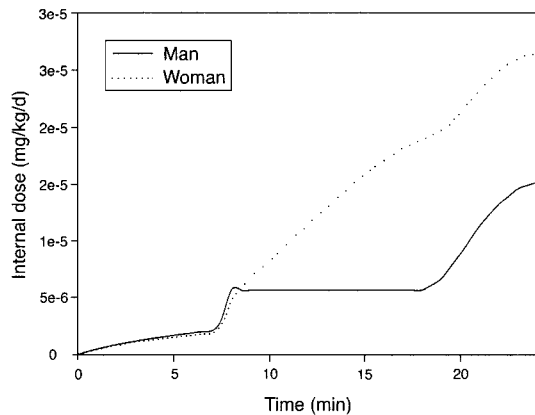


Fig. 5. Estimated 24-h total amount of benzene accumulated in human body for base case.

인체노출 시나리오의 특성에 따라 남성의 경우 출근후 퇴근전까지는 체내축적량이 변화가 없게 되는데, 이 결과 남성의 경우 체내축적량은 1.52×10^{-5} mg/kg/d이며 여성의 경우는 2.64×10^{-5} 로써 여성의 경우가 남성의 경우보다 1.74배 높은 축적량을 보이고 있다.

그림 6과 표 5는 최악경우에 따른 Benzene의 남녀별 체내축적량을 보여주고 있다. 이 경우 남녀별 노출시나리오가 같으므로 그림 4와 달리 체내축적량의 양상이 남녀가 동일한 인체축적 양상을 보여주고 있다. 남성은 상대적으로 높은 몸무게당 호흡

Table 4. Total internal doses of BTEX through inhalation for base case.

	Man	Woman
Internal dose (mg/kg/day)		
Benzene	1.52×10^{-5}	2.64×10^{-5}
Toluene	1.02×10^{-4}	1.77×10^{-4}
Ethylbenzene	1.17×10^{-4}	2.05×10^{-4}
Xylene	5.71×10^{-4}	1.01×10^{-3}

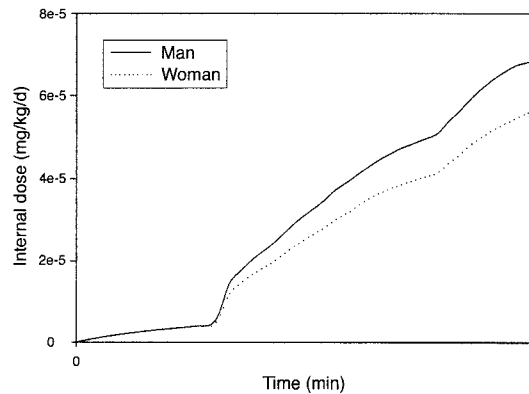


Fig. 6. Estimated 24-h total amount of benzene accumulated in human body for worst case.

Table 5. Total internal doses of BTEX through inhalation for worst case.

	Man	Woman
Internal dose (mg/kg/day)		
Benzene	6.85×10^{-5}	5.55×10^{-5}
Toluene	4.59×10^{-4}	3.72×10^{-4}
Ethylbenzene	5.33×10^{-4}	4.32×10^{-4}
Xylene	2.61×10^{-3}	2.11×10^{-3}

량으로 체내축적량은 6.85×10^{-5} mg/kg/d, 여성의 경우 5.55×10^{-5} mg/kg/d로 나타났다.

각 구역별로 체내축적량에 대한 기여도를 살펴보면, 남녀 모두 대부분의 체내축적량은 '그 밖의 집안' 구역에서의 Benzene의 농도로 흡입하여 생기는 것으로 나타났다. 기준경우와 최악경우를 비교하면, 남성은 최악의 경우 집안에 있는 시간이 길어지므로 '그 밖의 집안'의 Benzene농도의 공헌도가 증가한 반면 여성은 대부분의 생활용수사용이 '샤워실'에서 행해지는 바 각각에 대하여 점유율이 증가했으므로 결과적으로 샤워실의 기여도가 상승하게 되

었다.

3.3 위해도 계산

표 6은 지하수에 녹아있는 BTEX의 휘발로 인한 실내오염시 호흡노출의 경우 발암위해도와 비발암 위해도를 평가하여 보여주고 있다. 벤젠의 경우, EPA에서 허용가능한 발암위해도 수준이 10^{-4} 에서 10^{-7} 으로 최소수용농도 수준에 들어가 있었으며 비 발암물질에 대해서는 기준치인 1.0을 훨씬 밑도는 수준의 낮은 비발암위해가 계산되었다.

마지막으로 노출량을 모사하는데 사용되는 인자에 1%의 증가분을 주었을 때 노출량의 변화를 상

Table 6. Summary of cancer risk and hazard index of BTEX for the inhalation exposure. Released from groundwater for base case.

Compound	Risk and hazard index	
	Man	Woman
Benzene	4.41×10^{-7}	7.66×10^{-7}
Toluene	3.40×10^{-4}	5.90×10^{-4}
Ethylbenzene	1.17×10^{-3}	2.05×10^{-3}
Xylene	6.34×10^{-3}	1.12×10^{-2}

Table 7. Sensitivity analysis for benzene (based on a base case for woman).

Parameter (x)	Local relative sensitivity, dF/dx
Residence time of household air volume	1.0
Volume of the remainder of house	0.97
Ratio of breathing rate to body weight	0.82
Fraction of benzene inhaled available for uptake	0.70
Household occupancy from during a day	0.70
Transfer efficiency from shower water to air	0.30
Water used in shower	0.30
Volume shower room	0.24
Residence time of shower room air volume	0.24
Water used in other household activity	0.18
Transfer efficiency from household activities	0.18
Water used in face washing	0.15
Transfer efficiency from toilet to shower room air	0.15
Water used in toilets	0.15
Duration of shower	0.03
Amount of time spent in toilets	0.03

대적 비교를 통해 민감도분석을 하여 최종결과에 미치는 영향이 큰 주요 입력인자를 파악하여 표 7에 정리하였다. 이 분석에 의하면, ‘그 밖에 집안에 공기의 머무는 시간’, ‘그 밖의 집안의 부피’, ‘몸무게에 대한 호흡량’, ‘흡입되는 BTEX 중 체내에 흡수되는 비율’ 그리고 ‘그 밖의 집안에서의 점유율’ 등의 순서로 인체노출량계산에 영향을 미치고 있음을 보여주고 있다.

4. 결 론

주유소나 저유소 등 유류저장시설에서의 지하저장 탱크(UST)에서 발생하는 누유에 의해 주변토양과 지하수의 오염이 심각하게 우려되고 있으나 이러한 누유여부에 대한 조사는 초기단계에 있다. 또한 지표수의 부족으로 지하수를 취수하여 생활용수로 사용하는 경우가 늘어나는 추세를 감안할 때, 이렇게 오염된 지하수속에 용해되어 있는 주요 화학물질인 Benzene, Ethyl-benzene, Toluene 및 Xylene 이 실내공기중으로 휘발하여 발생하는 실내오염에 의한 인체건강영향에 대한 평가가 필요하게 되었다. 본 연구에서는 주택에서 지하수를 활용하는 경우 발생하는 BTEX의 실내오염 정도와 이에 따른 인체노출 경향을 정량적으로 평가하여 보았다.

1. 본 연구에서 개발한 2 구역모델로 국내 32평형 아파트를 대상으로 하여 모의한 결과, 생활용수를 사용하는 여러 활동등에 의해 지하수내 BTEX가 실내로 방출되며 이러한 실내 BTEX농도에 큰 영향을 주는 것은 샤워임을 알 수 있었고 그 외에도 세탁 등이 실내농도에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

2. 실내공기에 존재하는 BTEX은 호흡을 통해 체내로 축적되는데 이는 실내에서 활동양상이 다른 남자 및 여자의 하루 중 인체노출 시나리오에 따라 다른 양상을 보였다. Benzene의 기준 경우, 여성의 체내축적량이 남성에 비해 1.74배 정도 높은 것으로 나타났는데 이는 여성이 실내에서 활동하는 시간이 남성에 비해 월등히 높기 때문이다.

3. 수학적 모델을 사용하여 계산한 체내축적량을 바탕으로 한 인체위해도 평가결과, Benzene과 같은 발암물질의 위해도는 남녀 모두 10^{-7} 정도로 USEPA

에서 제시한 기준치를 초과하지 않으며, 나머지 비발암물질인 Ethyl-benzene, Toluene 및 Xylene의 비발암위해도 역시 기준치 1.0을 밑도는 낮은 수치를 보이고 있다.

4. 모델에서 사용한 입력인자의 민감도분석을 통해 인체노출평가에 영향을 주는 주요입력인자로는 각 구역에서의 공기 체류시간(air residence time), 구역의 부피, BR (t)/BW: 호흡량과 몸무게의 비, BTEX의 체내 흡수비율 및 샤워에서 공기 중으로 이동하는 전달효율 등으로 나타났다.

5. 본 연구의 결과로부터 BTEX의 실내오염으로 인한 체내축적을 감소시키기 위해서는 우선적으로 샤워 시간의 최소화가 권고되며 실내농도를 낮추는 건축물내의 환기시설의 설치 및 운영 역시 필요하다고 판단된다.

6. 본 결과는 비록 모델에서 사용한 입력인자의 불확실성이 존재하나 추후 오염된 지하수내 BTEX에 의한 실내오염시 인체위해평가에 대한 자료를 제공하여 인체노출저감을 위한 대책을 마련하는데 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

최관영, 유동한, 양지원 (1999) 주유소의 유류누출에 의한 인체 위험도 평가, 대한환경공학회지, 21, 1761-1771.
 한국표준과학연구원 (1992) 국민표준체위조사보고서, 공업

진홍청.

Bird, R.B. *et al.* (1960) Transport phenomena, JOHN WILEY & SONS, New York.
 Haddad, S. *et al.* (1999) Physiological modeling of the toxicokinetic interactions in a quaternary mixture of aromatic hydrocarbon, Toxicology and Applied Pharmacology, 161, 249-257.
 Han, M.Y. (1995) Water supply alternatives considering quality, quantity and Energy of Water, J. KSWQ, 11, 263-268.
 Kao, C.M. and C.C. Wang (2000) Control of BTEX migration by intrinsic bioremediation at a gasoline spill site, Wat. Res., 34(13), 3413-3423.
 McKone, T.E. (1987) Human exposure to volatile organic compounds in household tap water: the indoor inhalation pathway, Environ. Sci. Technol., 21, pp 1194-1201.
 Nakayama, A. *et al.* (2000) Comparison of the mutations induced by p-benzoquinone, a benzene metabolite, in human and mouse cells, Mutation Research, 470, 147-153.
 Prichard, H.M. and T.F. Gesell (1981) An estimate of population exposures due to radon in public water supplies in the area of Houston, Texas, Health Phys., 41, 599-606.
 Spengle, J.D. and D.W. Dockery (1981) Personal exposure to respirable particulates and sulfates, J. Air Pollut. Control Assoc., 31, 153-159.
 USEPA (2000) Drinking Water Contaminant (<http://www.epa.gov/OGWDW/hfacts.html>).