

## 다매체/다경로 노출을 고려한 benzo(a)pyrene의 총 인체 노출량 예측

문지영, 양지연\*, 임영욱\*\*, 박성은\*\*\*, 신동천\*,\*

연세대학교 보건대학원 환경보건학과, \*연세대학교 환경공학연구소,  
\*\*서남대학교 환경보건학과, \*\*\* (주)엔비이오니아

### Estimating Human Exposure to Benzo(a)pyrene through Multimedia/Multiroute Exposure Scenario

Ji Young Moon, Ji Yeon Yang\*, Young Wook Lim\*\*,  
Seong Eun Park\*\*\* and Dong Chun Shin\*,\*

Dept. of Environmental Health, Graduate School of Public Health, Yonsei Univ.,  
\*Institute for Environmental Research, Yonsei Univ.,  
\*\*Dept. of Environmental Health, Senam Univ., \*\*\*Envioneer Co.

#### ABSTRACT

The objective of this study was to estimate human exposure to benzo(a)pyrene through multimedia/multi-pathway exposure scenario. The human exposure scenario for benzo(a)pyrene was consisted of 12 multiple exposure pathways, and the multipathway human exposure model based on this scenario constituted. In this study, the multipathway human exposure model was used to estimate the concentrations in the exposure contact media, human intake factors and lifetime average daily dose (LADD<sub>model</sub>) of benzo(a)pyrene in the environment. Sensitivity analysis was performed to identify the important parameters and Monte-Carlo simulation was undertaken to examine the uncertainty of the model.

The total LADD<sub>model</sub> was estimated to be  $5.52 \times 10^{-7}$  mg/kg-day ( $2.06 \times 10^{-7} \sim 8.65 \times 10^{-7}$  mg/kg-day) using the multipathway human exposure model. The inhalation dose accounted for 78% of the total LADD, whereas ingestion and dermal contact intake accounted for 20.2% and 1.8% of the total exposure, respectively. Based on the sensitivity analysis, the most significant contributing input parameter was benzo(a)pyrene concentration of ambient air. Consequently, exposure via inhalation in outdoor/indoor air was the highest compared with the exposure via other medium/pathways.

**Key words** : benzo(a)pyrene, PAHs, lifetime average daily dose (LADD), multimedia/multipathway human exposure

#### 서 론

환경오염물질에 대한 인체 노출은 환경내의 모

든 매질과 먹이사슬을 통해서 일어나는 다중경로 (multi-pathway) 노출이기 때문에, 기존의 특정 매체를 중심으로 한 환경 및 인체 노출평가 (environmental and human exposure assessment)는 많은 한계를 드러내고있다.

오염물질에 수용체가 노출될 수 있는 가능한 모

※ To whom correspondence should be addressed.

Tel: +82-2-361-5361, E-mail: dshin5@yumc.yonsei.ac.kr

든 경로를 평가하는 다매체/다경로 노출평가(multi-media and multi-pathway exposure assessment) 접근법은 수용체에 대한 가능한 모든 노출 정보를 제공하여 매체별/경로별 인체 노출량을 산출하고, 총량적인 위해도 평가(total risk assessment)를 가능하게 하기 때문에 통합오염관리를 위한 필수적인 요소라 할 수 있다(Yang 등, 2002).

미국 환경보호청(US Environmental Protection Agency; 이하 US EPA)에서는 NHEXAS(National Human Exposure Assessment Survey) 프로그램을 통해 오염물질에 대한 인체 노출에 관련된 각종 정보를 얻어내고자 하는 연구 조사가 이루어지고 있다(Sexton 등, 1995). 미국의 ORD(Office of Research & Development)에서도 통합오염관리의 핵심기술 중 하나인 다매체(multimedia), 다경로(multipathway), 다수용체(multireceptor) 위해성 평가에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

환경잔류성 물질(Persistent Organic Pollutants; 이하 POPs) 중 하나인 다환방향족 탄화수소류(polycyclic aromatic hydrocarbons; 이하 PAHs)는 발암성 및 독성, 난분해성, 생물축적성의 특성을 가지고 있으며, 대기, 수질, 토양 등 다양한 환경 매체에서 검출되고 있다. 또한 일부 오염된 토양에서 재배된 곡물 및 채소, 육류 등과 이것으로써 제조된 식품에서도 검출된다. 이러한 특성에 의해 PAHs의 인체 노출 평가시 대기, 물, 토양, 식품을 통한 호흡 및 섭취, 그리고 피부접촉의 모든 경로를 고려하는 총 노출평가(total exposure assessment)에 대한 중요성이 제기되고 있다(Butler 등, 1979; Liroy, 1998).

PAHs는 휘발유, 쓰레기 소각, 목재류 등의 불완전 연소과정에서 발생되며, 독성학적 실험들을 통해 인체에 유발 가능한 발암물질로 알려져 있을 뿐 아니라 코크 생성물(cokes oven), 담배연기, 타르(tar)와 같이 사람에게 대해서 발암물질로 분류된 복합물질들의 주된 독성 원인물질이기도 하다(IARC, 1983). 특히, PAHs 중 benzo(a)pyrene은 거의 모든 동물종에서 발암성을 나타내는 물질이다. 또한 다른 PAHs의 독성지표물질(index compound)로서 사용되어지고 있기 때문에, benzo(a)pyrene의 정량적인 총 인체 노출평가 자료는 환경 및 보건학적 관리차원에서 유용하게 활용될 수 있다(Collins 등, 1991).

그러나, 현재까지 위해성 평가의 국내 연구는 단

일 매체를 대상으로 한 연구가 대부분이었고, 최근 다이옥신을 대상으로 한 다매체 환경 동태 연구(Lee, 1999)와 다매체/다경로 모델을 이용한 인체 노출량 예측 연구(Yang 등, 2002)가 부분적으로 진행된 바 있다. 그 외 기타 인체 유해물질에 대한 다매체/다경로 노출 평가 및 통합 위해성 평가에 대한 연구는 찾아보기 어려운 실정으로서, 본 연구에서는 다환방향족 탄화수소류 중 benzo(a)pyrene에 대해서 시도해 보았다.

따라서, 본 논문에서는 다매체/다경로를 고려한 인체 노출 모형을 구성하여 benzo(a)pyrene의 인체 총 노출량을 예측하였다. 구성된 모형을 통해 환경 중 benzo(a)pyrene의 매체/경로별 인체 노출량을 예측하여, 다매체/다경로 간의 인체 노출 기여도를 평가하였고, 불확실성 분석(uncertainty analysis)과 민감도 분석(sensitivity analysis)의 결과를 바탕으로 노출 모형의 영향 인자들을 보완하여 모형의 예측력을 향상시키고자 하였다.

## 연구 방법

### 1. 다매체/다경로 인체 노출 시나리오의 결정

환경오염에 의한 benzo(a)pyrene의 인체 총 노출량을 예측하기 위하여 오염된 공기의 흡입 노출, 음용수, 식품 및 토양 섭취에 의한 노출, 물 및 토양의 피부접촉을 통한 노출을 중심으로 benzo(a)pyrene의 다매체/다경로 인체 노출 시나리오를 결정하였다(Figure 1).

호흡 노출경로에는 실외 활동으로 인한 호흡노출, 실내활동 및 휴식에 의한 호흡노출, 그리고 물에서 실내공기 중으로 휘발되어 호흡기를 통해 일어나는 노출의 세 가지로 나누었으며, 섭취 노출경로에서는 직접적인 음용수의 섭취와 토양의 섭취, 오염된 토양에서 재배된 농작물의 섭취, 오염된 공기 및 지표수와 토양, 그리고 오염된 식물로 사육된 육류 섭취의 일곱 가지로 분류하였다. 또한, 피부접촉에 의한 것으로는 음용수와 토양에의 직접적인 두 가지 노출경로로서 나누어 보았다. 단, 본 연구에서는 지표수에서의 수영, 낚시 등의 취미활동(recreation)에 의한 피부접촉 노출은 고려하지 않았다.

최종적으로 총 12가지의 다중 노출 경로를 결정

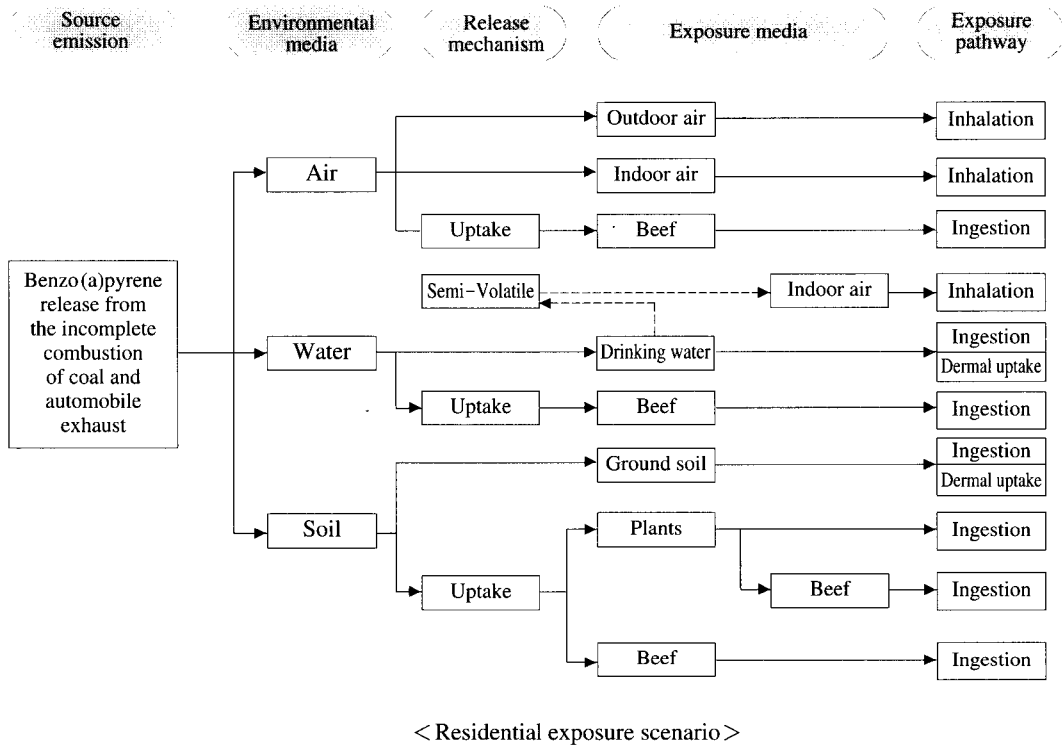


Fig. 1. Diagram of predicted process to multimedia-multipathway exposure scenario for benzo (a)pyrene in this study.

하였으며, 여기서는 연구 대상 지역에서 재배되는 농작물과 육류(beef cattle)는 모두 노출 지역에서 재배 및 사육, 포획되며, 수확량 모두를 대상 지역의 주민들이 소비한다는 가정을 두고 있다.

## 2. 다경로 인체 노출 평가 모델의 기본 모형 구성

기존의 인체 노출 평가 모델들(US EPA/CalTOX, 1996b; Smart\_RISK, 1996; US EPA/REx 2.1G, 2000 등)의 알고리즘의 기반이 되고 있는 US EPA의 인체 노출 평가 지침서(Risk Assessment Guideline for Superfund/Human Health Evaluation Manual; 이하 RAGS/HHEM)에 수록된 인체 노출량 산출식과 관련 연구자들(McKone, 1987; Fisk, 1987; Brown 등, 1984 등)이 제시한 기본 수식들을 바탕으로, benzo(a)pyrene의 다경로 인체 노출 모형(multi-pathway human exposure model)의 기본 산출식(Eq. 1~11)을 구성하였다.

특히, 오염된 대기 및 수질, 토양의 환경 매체

(environmental media)로 인한 실내·외 공기 오염, 음용수 및 주택 주변의 지표토양 오염 등 인체 접촉 매체(exposure contact media)에서의 오염도 예측에는 매체간 오염 전이계수(inter-media transfer factor; 이하 TF)를 이용하였다. 그리고 오염지역에서 생산되는 농작물 및 육류에서의 오염도는 생체 전환계수(biotransfer factor) 또는 생체축적계수(bioaccumulation factor)를 적용하여 예측하였다. 각 수식에 이용한 기호에 대한 설명은 부록-A에 나타내었다.

### 1) 인체 접촉 매체에서의 오염도 예측

인체 노출 매체(human exposure media,  $C_i$ )인 실외 공기와 실내 공기, 지표 토양, 그리고 농작물 및 육류에서의 오염도는 오염된 환경 매체(대기, 지표수 및 토양의 오염도; 이하  $C_k$ )에 의해 영향을 받기 때문에 매체간 오염전이계수( $TF_{k \rightarrow i}$ )를 이용하는 수식을 적용하였다(Eq. 1).

$$C_i = TF_{(k \rightarrow i)} \times C_k \quad (\text{Eq. 1})$$

육류에서의 오염도는 가축이 사육되어지는 동안에 오염된 지표수, 토양, 농작물(또는 목초)을 섭취하였을 가능성을 고려하여 예측하였다. 가축의 호흡율, 물 섭취량, 토양 섭취량 및 사료 섭취량( $I_{ibc}$ )과 생체전환계수( $Bt$  (meat)) 또는 생체축적계수를 이용하여 Eq. 2와 같이 오염 전이 계수( $TF_{i \rightarrow m}$ )를 산출한다. 육류 오염도는 매체별 오염 전이 계수와 매체별 오염도( $C_i$ )를 곱하여 합산한 것으로 산출하였다(Eq. 3).

$$TF(i \rightarrow m) = I_{ibc} \times Bt \text{ (meat)} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$C_m = [TF(a \rightarrow m) \times C_{air}] + [TF(w \rightarrow m) \times C_{water}] \\ + [TF(s \rightarrow m) \times C_{soil}] + [TF(fvg \rightarrow m) \times C_{fvg}] \quad (\text{Eq. 3})$$

### 2) 호흡에 의한 인체노출인자

인체 호흡 노출은 실외 활동, 실내 활동 및 휴식에 의한 호흡노출, 그리고 물에서 실내공기 중으로 휘발된 benzo(a)pyrene의 호흡기를 통한 노출의 세 가지 경로로 구성하였다.

호흡에 의한 인체노출인자(human intake factor; 이하 HIF)는 US EPA에서 제안하고 있는 RAGS/HHEM (US EPA, 1989a, b)의 기본 수식을 바탕으로 구성하였다. 본 논문에서는 호흡에 의한 HIF를 위해 호흡률( $BR$ ), 체중( $BW$ ), 노출빈도( $EF$ ), 노출기간( $ED$ ), 평균시간( $AT$ )을 고려하였으며, 특히 실내와 실외에서의 노출량을 세분화하여 평가하기 위해 실내 점유 시간( $ISR$ )을 고려하였다. 또한 실외 활동시의 호흡률은 활발한 활동시(active 또는 high) 일일호흡율( $BR_h$ )을 적용하였고(Eq. 4), 실내에서의 호흡율은 휴식시(resting 또는 light) 일일호흡율( $BR_l$ )을 적용하였다(Eq. 5).

$$HIF_{aa}^{inh} = \frac{BR_h}{BW} \times \frac{EF \times ED}{AT} \times (1 - ISR) \quad (\text{Eq. 4})$$

$$HIF_{ia}^{inh} = \frac{BR_l}{BW} \times \frac{EF \times ED}{AT} \times ISR \quad (\text{Eq. 5})$$

그리고, 물에서 실내공기 중으로 휘발되어 호흡기를 통해 일어나는 노출의 예측을 위해서 McKone (1987)의 음용수를 통한 호흡 노출평가 모델에서 제시하고 있는 오염물질의 물중에서 공기중으로의 질량이동계수(mass transfer efficiency; 이하  $MTE_z$ )를 이용하였다. 실내에서의 물 사용에 의한 호흡

노출 HIF는 질량이동계수( $MTE_z$ ), 물 사용량( $W_z$ )과 노출시간( $ET_z$ ), 환기량( $VR_z$ ), 실내에서의 호흡률( $BR_l$ ), 체중( $BW$ ), 노출기간( $ED$ ) 등을 고려하여 산출하였다(Eq. 6).

$$HIF_{dw}^{inh} = \frac{BR_l}{BW} \times \frac{EF \times ED}{AT} \times \left( \left( \frac{W_b \times MTE_b}{VR_b} \times ET_b \right) + \left( \frac{W_h \times MTE_h}{VR_h} \times ET_h \right) \right) \times CF \quad (\text{Eq. 6})$$

### 3) 섭취에 의한 인체노출인자

섭취 노출의 경우, 직접적인 음용수의 섭취와 토양의 섭취, 육류 섭취 및 농작물의 섭취의 네 가지로 분류하였다.

음용수, 토양 및 육류를 통한 섭취노출 HIF는 수식 Eq. 7에서 보는 바와 같이 각각의 섭취량( $IR_i$ )에 체중( $BW$ )과 노출빈도( $EF$ ) 및 기간( $ED$ )을 고려한 기본 수식을 이용하였다(US EPA, 1989a, b).

$$HIF_i^{ing} = \frac{IR_i}{BW} \times \frac{EF \times ED}{AT} \quad (\text{Eq. 7})$$

채소 및 과일류의 경우 실제로 사람이 식용하는 부위가 열매, 잎 정도로 한정되어 있고, 오염물질이 뿌리(root) 등과 같은 농작물의 특정부위로 보다 많이 전이되어질 가능성이 있기 때문에, 농작물이 오염물질에 직접 노출되거나 오염된 물, 토양과 같은 매체를 통해 간접 노출된다 하더라도 인체로 섭취되어 실제 노출될 수 있는 비율( $F_{fv}$ )을 고려해 주어야 한다(Eq. 8).

$$HIF_{fv}^{ing} = \frac{(IR_{fv} \times F_{fv}) + IR_g}{BW} \times \frac{EF \times ED}{AT} \quad (\text{Eq. 8})$$

### 4) 피부 접촉에 의한 인체노출인자

피부접촉을 통한 노출경로로는 물과 토양에 의한 직접적인 두 가지 피부접촉으로 나누어 보았다.

물에 의한 직접적인 피부노출은 주로 샤워 또는 목욕, 그리고 세탁, 청소와 같은 가사일을 할 때 발생하기 때문에 일일 노출시간( $ET$ )과 빈도( $EF$ ), 그리고 직접적으로 물과 닿는 피부면적( $SA$ )에 대한 인자가 중요하다. 물을 통한 피부노출 예측에 사용되어진 기본 수식은 Brown 등(1984)의 연구에서 인용하였으며, 이 수식은 노출시간( $ET_z$ )을 노출 장소별로 세분화하였고 피부 노출율( $F_s$ ) 및 피부침투 계수( $SP$ )에 대한 인자가 고려되었다(Eq. 9).

$$HIF_{dw}^{uptake} = \frac{SA \times F_s \times SP}{BW} \times \frac{(ET_b + ET_h) \times EF \times ED}{AT} \times CF \quad (\text{Eq. 9})$$

토양에 의한 피부접촉노출 HIF는 체표면적 (SA), 피부에 대한 흡수율 (ABS), 토양의 점착계수 (AF), 그리고 체중 (BW)과 노출시간이 고려되었다 (Eq. 10).

$$HIF_s^{uptake} = \frac{SA \times AF \times ABS}{BW} \times \frac{EF \times ED}{AT} \times CF \quad (\text{Eq. 10})$$

5) 인체 노출 시나리오에 따른 매체별/경로별 인체 노출량 예측

각 경로별로 산출된 HIF에 인체 접촉 매체별 오염도 (C<sub>i</sub>)를 곱하여, 일일 평균 인체 노출량 (lifetime average daily dose; 이하 LADD<sub>model</sub>)을 예측하였다 (Eq. 11).

$$LADD_{ijk} = HIF_{ijk} \times C_i \quad (\text{Eq. 11})$$

3. 다매체/다경로 인체 노출량 예측을 위한 주요 인자값의 결정

1) 연구 대상 지역 선정 및 환경 중 benzo(a)pyrene의 오염도

Benzo(a)pyrene은 그 특성상 차량 및 난방 연료의 불완전 연소에 의해 발생되어 도시 대기 중에 분포하고 있으며, 특히 디젤의 연소 배기가스를 통해 다량 배출되는 것으로 알려져 있다. 인위적 오염원이 많은 자동차 밀집 도시 지역이 그렇지 않은 지역(전원 지역)보다 대기 중 benzo(a)pyrene 농도가 높다고 보고되고 있기 때문에, 우리나라의 대표적인 대도시인 서울을 연구 대상 지역으로 선정하였으며, 서울지역의 일반적인 특성은 Table 1에서 나타내었다.

연구 대상 지역에서의 환경 오염도는 환경부 G7 3단계 연구 중 benzo(a)pyrene의 다매체 환경 동태 예측 모형 (multimedia environmental fate model)을 통해 예측된 오염도를 인용하였다(서울대 환경대학원, 2001; 연세대 환경공해연구소, 2001). Benzo(a)pyrene의 다매체 환경 동태 예측 모형에서는 연구 대상 지역의 benzo(a)pyrene 오염원으로 차량 운행으로

Table 1. Characteristics of the Seoul in Korea

Contents	Korea	Seoul (%)
Total area (km <sup>2</sup> )	99,461	606 (0.6)
Farming land area (km <sup>2</sup> )	18,888	21 (0.1)
Population (person)	46,136,101	9,895,217 (21.5)
Population density (person/km <sup>2</sup> )	463	17,132
Number of house <sup>1)</sup>	9,204,929	1,688,111 (18.3)
Registration numbers of automobiles <sup>2)</sup>	12,728,038	2,531,797 (19.9)
Average traffic density (car/day) <sup>3)</sup>	-	75,756

Source : KOSIS (2000), <sup>1)</sup>KOSIS (1995), <sup>2)</sup>KOSIS (2001), <sup>3)</sup>Seoul Metropolitan Police Administration (1999)

Table 2. A comparison between predicted concentrations and measured concentrations for benzo(a)pyrene in Seoul

Environmental media	Multimedia environmental fate model <sup>1)</sup>		G7-Project <sup>2)</sup>
	Predicted conc.	Measured conc.	Measured conc.
Ambient air (mg/m <sup>3</sup> )	10 <sup>-7</sup> ~ 10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-6</sup>
Surface water (mg/l)	10 <sup>-9</sup> ~ 10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-8</sup> ~ 10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-6</sup>
Surface soil (mg/kg)	10 <sup>-5</sup> ~ 10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup> ~ 10 <sup>-2</sup>	-

Source : <sup>1)</sup>서울대 환경대학원, 2001.

<sup>2)</sup>연세대 환경공해연구소, 1996; 1999.

인한 배기가스와 난방 연료의 불완전 연소에 의해 발생하는 오염원만을 고려하였다. 다매체 동태예측 모형 자료를 이용하기 전에 예측 오염도의 타당성을 평가하기 위해, 예측 오염도를 서울지역의 실측 모니터링 자료 (서울대 환경대학원, 2001; 연세대 환경공해연구소, 1996; 1999)와 비교하였다 (Table 2). Benzo(a)pyrene에 대한 대기과 지표수의 예측치 경우는 각각 10<sup>-7</sup> ~ 10<sup>-6</sup>, 10<sup>-9</sup> ~ 10<sup>-5</sup> 정도의 수준이었고, 토양은 10<sup>-5</sup> ~ 10<sup>-3</sup> 수준으로서, 실측 결과와 유사하거나 근접한 농도 범위인 것으로 평가되었다.

Benzo(a)pyrene의 다매체 환경 동태 예측 모형의 정상상태에서 예측된 1년 (365일 평균 자료)간의 이 오염도 자료를 이용하여 각 환경 매체별 오염도 분포를 결정하였다. 대기과 토양에서의 오염

**Table 3.** Distribution of benzo(a)pyrene concentration in environmental media applied to model

Media	Concentration <sup>1)</sup>	Distribution	
Ambient air (mg/m <sup>3</sup> )	Mean ± S.D. <sup>2)</sup>	$3.66 \times 10^{-6} \pm 1.42 \times 10^{-6}$	<p>Lognormal distribution</p>
	Median	$3.50 \times 10^{-6}$	
	Range (Min. ~ Max.)	$1.49 \times 10^{-6} \sim 6.55 \times 10^{-6}$	
Surface water (mg/L)	Mean ± S.D. <sup>2)</sup>	$3.29 \times 10^{-5} \pm 1.80 \times 10^{-5}$	<p>Normal distribution</p>
	Median	$3.02 \times 10^{-5}$	
	Range (Min. ~ Max.)	$1.13 \times 10^{-5} \sim 9.29 \times 10^{-5}$	
Surface soil (mg/kg)	Mean ± S.D. <sup>2)</sup>	$4.22 \times 10^{-3} \pm 4.64 \times 10^{-4}$	<p>Lognormal distribution</p>
	Median	$4.13 \times 10^{-3}$	
	Range (Min. ~ Max.)	$3.67 \times 10^{-3} \sim 4.93 \times 10^{-3}$	

<sup>1)</sup>Multimedia environmental fate model에 의해 예측된 오염도(서울대 환경대학원, 2001)

<sup>2)</sup>S.D. : standard deviation

도는 각각  $3.66 \times 10^{-6} \pm 1.42 \times 10^{-6}$ ,  $4.22 \times 10^{-3} \pm 4.64 \times 10^{-4}$ 으로 대수-정규(log-normal) 분포를 보였으며, 지표수의 오염도는  $3.29 \times 10^{-5} \pm 1.80 \times 10^{-5}$ 으로서 정규(normal) 분포를 나타내었다(Table 3).

2) Benzo(a)pyrene의 물리·화학적 특성 및 확률분포 모형 결정

다매체/다경로 인체 노출 평가 모형에 적용한 benzo(a)pyrene의 물리·화학적 특성인자값은 문헌 고찰을 통해 결정하였다. 본 모형에 적용한 benzo(a)pyrene의 물리·화학적 특성 인자값과 확률분포 모형을 Table 4에 제시하였다.

반휘발성(semi-volatile)인 benzo(a)pyrene의 대기(실외)에서 실내공기로의 전이계수(TF)는 실외 오염도가 실내로 100% 전이된다고 가정하여 1을 적용하였다. 국내 원수 및 정수 중 benzo(a)pyrene 오염도 측정 자료(연세대 환경공해연구소, 1996)를 이용하여 정수처리에 의한 지표수 중 benzo(a)pyrene의 제거율은 평균 85% 정도로 산출되었다. 따라서 정수 처리과정에 의한 지표수에서 먹는 물로의 오

염 전이계수는 0.15를 적용하였다.

또한, 생체전환계수(biotransfer factor)로는 가축의 먹이에 의한 육질로의 전이계수가 0.029 day/kg, 오염된 공기에 의한 식물로의 전이계수가  $5.9 \times 10^5$  m<sup>3</sup>/kg으로 조사되었다. 토양에 의한 식물로의 분배계수는  $1.5 \times 10^{-2}$  kg/kg이며, 특히, 강우에 의해 손실되는 경우는  $3.4 \times 10^{-3}$  kg/kg으로 구분하여 적용하였다.

3) 성인의 인체노출인자 특성 및 확률분포모형 결정

한국 성인의 인체노출인자에 관한 특성 중 평균 체중은 60 kg (보건복지부, 1997)을 적용하였으며, 체표면적은 체중을 바탕으로 Eq. 12를 통해 산출된 값을 이용하였다(US EPA, 1989b).

$$SA = 0.1 \times BW^{(2/3)} \tag{Eq. 12}$$

그 밖의 연구 대상 지역의 인체노출인자와 관련된 세부적 특성에 대해서는 Table 5에 기술하였다. 인체노출인자 중 체중, 일일 물 섭취량, 일일 식품

**Table 4.** Summary of chemical properties for benzo(a)pyrene

Chemical property	Benzo(a)pyrene		Probability distribution
	Value (S.D. <sup>2)</sup> )	Range	
Molecular weight (g/mol)	252.3	—	point
Octanol-Water partition coefficient (unitless)	$2.20 \times 10^6$	—	point
Henry's Law Constant (Pa-L/mol)	92	—	point
Universal gas constant (Pa-L/mol-k)	$8.32 \times 10^3$	—	point
Diffusion coefficient in water (m <sup>2</sup> /s)	$6.13 \times 10^{-10}$	$4.60 \times 10^{-10} \sim 7.66 \times 10^{-10}$	uniform
Diffusion coefficient in air (m <sup>2</sup> /s)	$5.09 \times 10^{-6}$	$4.68 \times 10^{-6} \sim 5.50 \times 10^{-6}$	uniform
Transfer factor from ambient air to indoor air (unitless)	1	0.9~1	uniform
Transfer factor from surface water to drinking water (unitless) <sup>1)</sup>	0.15	0.05~0.3	uniform
Biotransfer factor in meat relative to cattle-diet contaminant intake (day/kg[m])	0.029	$3.45 \times 10^{-3} \sim 5.5 \times 10^{-2}$	triangular
Biotransfer factor in plants relative to contaminant air concentration (m <sup>3</sup> [air]/kg[p])	$5.9 \times 10^5$ ( $8.26 \times 10^6$ )	—	lognormal
Partition coefficient in plants relative to soil concentration (kg[s]/kg[p])	$1.5 \times 10^{-2}$ (0.015)	—	lognormal
Plant-soil partition coefficient for surface soil due to rainsplash (kg[s]/kg[p])	$3.4 \times 10^{-3}$ (0.0034)	—	lognormal

Source : CalTOX (US EPA, 1996b), <sup>1)</sup> 연세대 환경공해연구소(1996), <sup>2)</sup> S.D. : standard deviation

섭취량, 물 사용량, 일일 샤워 시간 등 11개 인자들에 대해서는 국내 연구 자료(보건복지부, 1997; 연세대 환경공해연구소, 1996, 1999)를 이용하였다. 체표면적, 일일 호흡율, 노출 기간, 사육되는 가축에서의 노출 접촉율, 피부침투계수 등 17개 인자들에 대해서는 국내 연구 자료가 구축되어 있지 않아 국외 연구 자료를 인용하였다(US EPA, 1989, 1991, 1992b, 1995a, 1996b, 1997; Mackon and Bogen, 1992).

#### 4. 불확실성 및 민감도 분석을 통한 다매체/다경로 인체 노출 모형의 보정

다매체/다경로 인체 노출 모형을 통해 예측된 결과에 대한 불확실성을 최소화하기 위해서 각 인자들에 대한 Monte-Carlo simulation을 실시하여, 예측 결과의 확률분포를 결정하였다.

또한, benzo(a)pyrene에 대한 다경로 인체 노출 모형을 보정하기 위하여, 모형에 적용되었던 다양한 인자들 중에서 매체/경로별 인체 노출량 예측 결과에 유의한 영향을 미치는 인자들을 도출하기 위한 민감도 분석(sensitivity analysis)을 실시하였다(Eq. 13).

$$Sensitivity = \frac{LADD_{baseline} - LADD_{10\%}}{X_{baseline} - X_{10\%}} \times \sigma \quad (\text{Eq. 13})$$

본 연구에서는 불확실성 분석(uncertainty analysis)과 민감도 분석(sensitivity analysis)을 위해서 Crystal ball software 2000 (v5.2)를 사용하였으며, 분석 결과를 바탕으로 영향 인자들의 자료들을 보완하여 모형의 예측력을 향상시켰다.

### 연구 결과

#### 1. 인체 노출 매체별 benzo(a)pyrene의 예측 농도

대기, 수질 및 토양의 환경매체에서의 농도를 가지고 다경로 인체 노출 모형에 적용하여 실제 인체 접촉매체로 전이된 benzo(a)pyrene의 농도를 예측하였다(Table 6). 실외 공기중의 평균 오염도는  $3.66 \times 10^{-6}$  mg/m<sup>3</sup>이었고, 실내 공기는  $3.48 \times 10^{-6}$  mg/m<sup>3</sup>으로 예측하였다. 음용수 중의 평균 benzo(a)pyrene의 오염도는  $5.75 \times 10^{-6}$  mg/l이었고, 지표토양 중의 오염도는  $4.22 \times 10^{-3}$  mg/kg으로 예측되었다. 그리고 오염된 환경매체에 의한 식품에서의 benzo(a)pyrene

**Table 5.** Summary of human exposure factors in this study

Human exposure factor	Value (range)	Standard deviation	Probability distribution
Body weight (kg) <sup>2)</sup>	60	5.1	lognormal
Available surface area (cm <sup>2</sup> ) <sup>4)</sup>	15326	2963	lognormal
Skin permeability coefficient (m/hr)	0.012 (0.001 ~ 0.0408)	—	triangular
Absorption factor (unitless) <sup>4)</sup>	0.01 (0.001 ~ 0.01)	—	uniform
Adherence factor (mg/cm <sup>2</sup> ) <sup>4)</sup>	1	—	point
Light activity breathing rate (m <sup>3</sup> /day) <sup>5)</sup>	13.25	2.49	lognormal
High activity breathing rate (m <sup>3</sup> /day) <sup>5)</sup>	31.2	11.8	lognormal
Ingestion rate of drinking water (L/day) <sup>1)</sup>	1.3	0.29	lognormal
Ingestion rate of soil (kg[s]/day)	2.1 × 10 <sup>-5</sup>	6.3 × 10 <sup>-5</sup>	lognormal
Ingestion rate of grains (kg[c]/day) <sup>2)</sup>	0.306	0.02601	lognormal
Ingestion rate of plants (kg[fvg]/day) <sup>2)</sup>	0.432	0.03672	lognormal
Ingestion rate of meat (kg[m]/day) <sup>2)</sup>	0.03	0.00255	lognormal
The daily inhalation rate of cattle (m <sup>3</sup> /day)	122	36.6	lognormal
Ingestion of water by beef cattle (L/day)	35	7	lognormal
Ingestion of soil by beef cattle (kg[s]/day)	0.4	0.28	lognormal
Ingestion of plants by beef cattle (kg[fvg]/day)	60	24	lognormal
Fraction rate of exposed skin (unitless) <sup>1)</sup>	0.65 (0.4 ~ 0.9)	—	uniform
Fraction of fruits and vegetables consumed that are exposed produce (unitless)	0.47	0.047	lognormal
Water consumer in bathroom (L/hr) <sup>1)</sup>	381.3	258.1	lognormal
Water consumer in house (L/hr) <sup>1)</sup>	471.4	200.6	lognormal
Ventilation rate of bathroom (m <sup>3</sup> /hr) <sup>3)</sup>	54 (10 ~ 100)	—	uniform
Ventilation rate of house (m <sup>3</sup> /hr) <sup>3)</sup>	750 (300 ~ 1200)	—	uniform
Exposure time for showers (hr/day) <sup>1)</sup>	0.32	0.19	lognormal
Exposure time for household water uses (hr/day) <sup>1)</sup>	1.23	0.81	lognormal
Rate of exposure time in indoor (unitless) <sup>1)</sup>	0.8 (0.3 ~ 1)	—	triangular
Exposure frequency (days/year) <sup>4)</sup>	350 (180 ~ 365)	—	triangular
Exposure duration (years) <sup>4)</sup>	30 (24 ~ 30)	—	uniform
Averaging time (days) <sup>4)</sup>	25550	2555	lognormal

Source : CalTOX (US EPA, 1996b), <sup>1)</sup>연세대 환경공해연구소 (1996; 1999), <sup>2)</sup>보건복지부 (1997), <sup>3)</sup>Mackon & Bogen (1992), <sup>4)</sup>US EPA (1989, 1991, 1992b, 1995a), <sup>5)</sup>NCEA (US EPA, 1997)

오염도는 농작물에서  $1.43 \times 10^{-5}$  mg/kg, 육류에서  $1.20 \times 10^{-4}$  mg/kg으로 예측되었다.

## 2. Benzo(a)pyrene의 일일 평균 인체 노출량 예측

다매체/다경로 인체 노출 모형에 의한 성인의 benzo(a)pyrene 일일 평균 총 인체 노출량(Total LADD<sub>model</sub>)은 평균  $5.52 \times 10^{-7}$  mg/kg-day이며, 50th percentile은  $4.19 \times 10^{-7}$  mg/kg-day, 95th percentile은  $8.65 \times 10^{-7}$  mg/kg-day로 예측되었다 (Table 7).

Table 8은 다경로 인체 노출 모형의 Monte-Carlo simulation을 통해 얻어진 노출 경로별 인체 노출

량의 예측 분포에 대한 결과이다. 흡입에 의한 평균 노출량은  $4.22 \times 10^{-7}$  mg/kg-day, 섭취에 의한 평균 인체 노출은  $1.19 \times 10^{-7}$  mg/kg-day이며, 피부 접촉에 의한 평균 노출량은  $1.07 \times 10^{-8}$  mg/kg-day이었다. Benzo(a)pyrene의 인체 노출량을 경로별로 비교해 보면, 흡입에 의한 노출이 가장 컸으며, 그 다음으로는 구강 섭취, 피부 접촉에 의한 노출 순이었다.

## 3. 일일 평균 인체 노출량에 대한 매체/경로별 기여율 비교

다매체/다경로를 모두 고려하여 산출된 환경 중 benzo(a)pyrene의 총 인체 노출량에 대하여 각 노



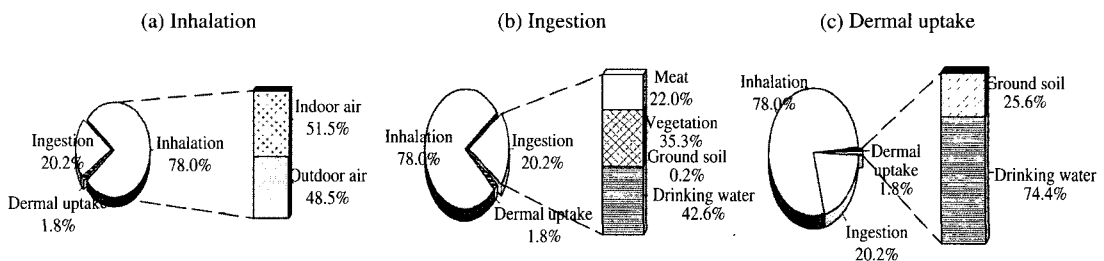
**Table 6.** Prediction of benzo(a)pyrene concentrations in the exposure contact media using the multipathway human exposure model

Exposure contact media	Concentration of benzo(a)pyrene			
	Mean	Median	Range (5th~95th)	
Outdoor air (mg/m <sup>3</sup> )	$3.66 \times 10^{-6}$	$3.50 \times 10^{-6}$	$1.49 \times 10^{-6} \sim 6.55 \times 10^{-6}$	
Indoor air (mg/m <sup>3</sup> )	$3.48 \times 10^{-6}$	$3.22 \times 10^{-6}$	$1.67 \times 10^{-6} \sim 6.19 \times 10^{-6}$	
Drinking water (mg/l)	$5.75 \times 10^{-6}$	$4.94 \times 10^{-6}$	$4.10 \times 10^{-7} \sim 1.37 \times 10^{-5}$	
Ground soil (mg/kg)	$4.22 \times 10^{-3}$	$4.13 \times 10^{-3}$	$3.67 \times 10^{-3} \sim 4.93 \times 10^{-3}$	
Foods (mg/kg)	Vegetables, fruits, and grains	$1.43 \times 10^{-5}$	$1.01 \times 10^{-5}$	$2.50 \times 10^{-6} \sim 4.03 \times 10^{-5}$
	Meat	$1.20 \times 10^{-4}$	$1.07 \times 10^{-4}$	$3.65 \times 10^{-5} \sim 2.44 \times 10^{-4}$

**Table 7.** LADD<sub>model</sub><sup>1)</sup> of benzo(a)pyrene by multimedia/multipathway human exposure

Exposure pathway	Exposure contact media	LADD (mg/kg-day)		
		Mean	Median	Range (5th~95th)
Inhalation	Outdoor air	$1.56 \times 10^{-7}$	$1.42 \times 10^{-7}$	$3.16 \times 10^{-8} \sim 4.85 \times 10^{-7}$
	Indoor air	$2.66 \times 10^{-7}$	$1.51 \times 10^{-7}$	$5.93 \times 10^{-8} \sim 3.56 \times 10^{-7}$
	Drinking water	$2.41 \times 10^{-20}$	$1.53 \times 10^{-20}$	$8.85 \times 10^{-22} \sim 1.04 \times 10^{-19}$
Ingestion	Drinking water	$4.39 \times 10^{-8}$	$3.23 \times 10^{-8}$	$2.53 \times 10^{-9} \sim 1.04 \times 10^{-7}$
	Ground soil	$6.07 \times 10^{-10}$	$1.44 \times 10^{-10}$	$1.25 \times 10^{-11} \sim 1.80 \times 10^{-9}$
	Vegetables, fruits, and grains	$5.00 \times 10^{-8}$	$2.68 \times 10^{-8}$	$6.40 \times 10^{-9} \sim 1.11 \times 10^{-7}$
	Meat	$2.47 \times 10^{-8}$	$1.67 \times 10^{-8}$	$5.24 \times 10^{-9} \sim 4.12 \times 10^{-8}$
Dermal uptake	Drinking water	$6.26 \times 10^{-9}$	$5.03 \times 10^{-9}$	$2.82 \times 10^{-10} \sim 2.85 \times 10^{-8}$
	Ground soil	$4.43 \times 10^{-9}$	$1.73 \times 10^{-9}$	$4.34 \times 10^{-10} \sim 3.91 \times 10^{-9}$
Total LADD		$5.52 \times 10^{-7}$	$4.19 \times 10^{-7}$	$2.06 \times 10^{-7} \sim 8.65 \times 10^{-7}$

<sup>1)</sup>LADD<sub>model</sub> : lifetime average daily dose using the Multipathway Human Exposure Model



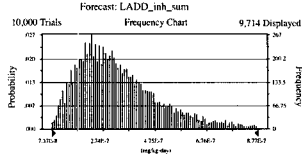
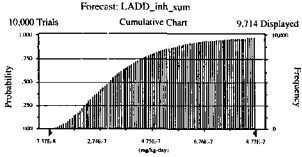
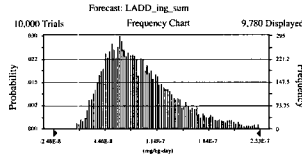
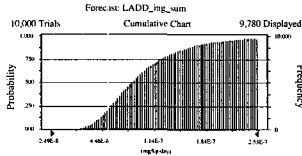
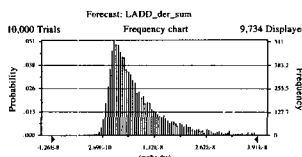
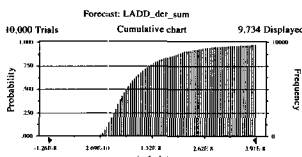
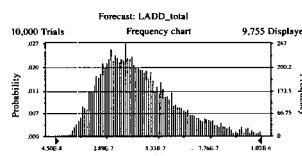
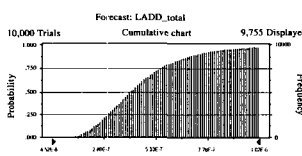
**Fig. 2.** Proportion of LADD<sub>model</sub> according to exposure pathway for benzo(a)pyrene

출 매체/경로별로 기여율을 살펴보았다(Figures 2-3).

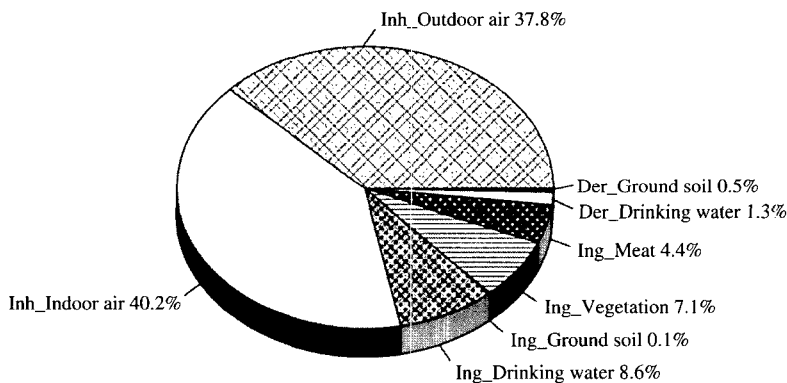
흡입에 의한 노출은 전체 총 인체 노출량의 77.99%를 차지하여 가장 큰 노출 기여율을 나타내었고, 그 중에서도 실내 공기에 의한 노출 기여율

이 51.5%로 실외 공기에서보다도 큰 비중을 차지하였는데, 이는 오염원이 비록 실외라 할지라도 실내로의 유입을 100% 가정한 이상, 노출 인자 중에서도 특히 실내·외 공간에서의 노출시간(exposure time)이 중요한 영향을 미친 것으로 판단된다.

**Table 8.** Distribution of LADD<sub>model</sub> according to exposure pathway for benzo(a)pyrene

Exposure pathway	LADD (mg/kg-day)	Distribution	
		PDF <sup>1)</sup>	CDF <sup>2)</sup>
Inhalation	Mean : $4.22 \times 10^{-7}$ 50 th : $3.11 \times 10^{-7}$ 95 th : $7.36 \times 10^{-7}$		
Ingestion	Mean : $1.19 \times 10^{-7}$ 50 th : $8.55 \times 10^{-8}$ 95 th : $2.08 \times 10^{-7}$		
Dermal uptake	Mean : $1.07 \times 10^{-8}$ 50 th : $6.99 \times 10^{-9}$ 95 th : $3.04 \times 10^{-8}$		
Total LADD	Mean : $5.52 \times 10^{-7}$ 50 th : $4.19 \times 10^{-7}$ 95 th : $8.65 \times 10^{-7}$		

<sup>1)</sup>PDF : probability density function, <sup>2)</sup>CDF : cumulative density function



**Fig. 3.** Proportion of LADD<sub>model</sub> by multipathway for benzo(a)pyrene.

그 다음으로 높은 기여율을 나타낸 것은 구강 섭취에 의한 것으로 총 노출량의 20.21%를 차지하고 있었다. 섭취 노출량 중 음용수에 의한 것이 42.6

%, 농작물은 35.3%, 육류에 의한 섭취가 22.0% 순으로 나타났으며, 토양의 섭취는 아주 미미한 수준이었다.

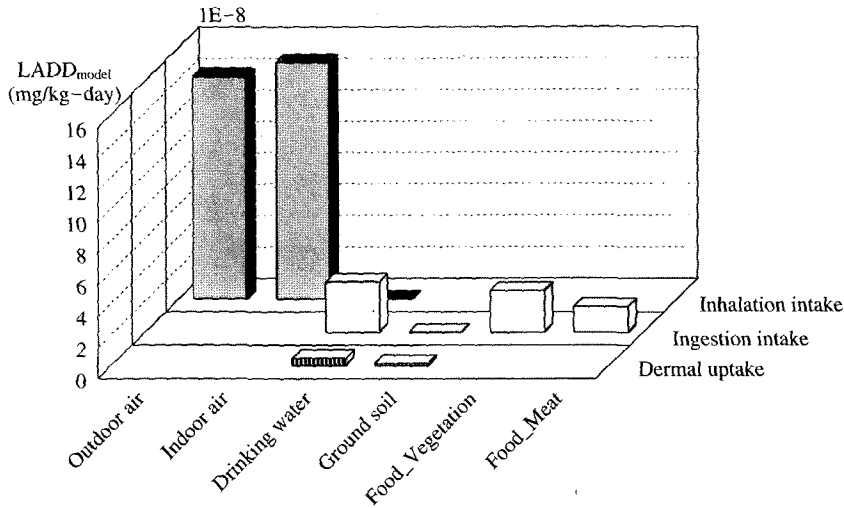


Fig. 4. Comparison of LADD<sub>model</sub> of benzo(a)pyrene in the exposure contact media and exposure pathway using the Multipathway Human Exposure Model.

노출 경로 중에서도 총 인체 노출량에 가장 낮은 기여율을 보이는 것이 피부접촉에 의한 노출로서 1.8%를 나타내었다. 피부 노출량 중 음용수에 의한 피부노출이 74.4%로 토양에 의한 노출(25.6%)에 비해 높은 기여율을 보였으며, 이러한 노출은 샤워나 목욕, 그리고 가사일을 하는 동안 물과 피부가 접촉하는 사이에 발생하는 것으로 볼 수 있다.

다매체/다경로를 고려하여 산출된 benzo(a)pyrene의 일일 평균 총 인체 노출량에 가장 큰 영향을 미치는 환경매체는 대기의 오염으로 분석되었다(Figure 4). 대기 오염에 의한 노출 경로로서 실내·외 공기의 흡입에 의한 영향이 가장 크게 나타났으며, 실내와 실외공기의 흡입으로 인한 일일 평균 인체 노출량은 각각  $1.51 \times 10^{-7}$  mg/kg-day,  $1.42 \times 10^{-7}$  mg/kg-day로 예측되어 실외보다는 실내에서의 노출량이 다소 높음을 보여주고 있다. 그 다음으로는 지표수 오염에 의한 음용수의 섭취 노출이 높았으며,  $3.23 \times 10^{-8}$  mg/kg-day로 예측되었다. 그 외 섭취에 의한 노출 중에서는 식품 중의 농작물에 의한 노출량이  $2.68 \times 10^{-8}$  mg/kg-day, 육류 섭취에 의한 노출량은  $1.67 \times 10^{-8}$  mg/kg-day로 육류보다는 농작물에 의한 노출량이 약간 높은 것으로 나타났다. 이는 우리나라 현대인의 식단이 서구화로 가는 추세이지만, 아직까지는 한국인의 경우 주식으로 먹는 음식이 주로 곡류, 채소류로 구성되어

있기 때문인 것으로 사료된다. 그리고, 음용수와 토양을 통해 피부접촉으로 발생하는 인체 노출량은  $10^{-9}$  mg/kg-day로서 아주 미미한 수준이었다.

#### 4. 다경로 인체 노출 모형의 민감도 분석

Benzo(a)pyrene의 다경로 인체 노출 모형을 보정하기 위하여, 모형에 적용되었던 다양한 인자들(factors) 중에서 매체/경로별 인체 노출량 예측결과에 유의한 영향을 미치는 인자들을 도출하기 위한 민감도 분석(sensitivity analysis)을 실시하였다.

앞에서의 benzo(a)pyrene에 대한 9가지 매체/경로별 인체 노출 모형을 종합하여 하나의 다경로 인체 노출 모형으로서 구성하였고, 여기서 예측되는 benzo(a)pyrene의 일일 평균 총 인체 노출량에 대해서 민감도 분석을 실시한 결과, 대기 중의 benzo(a)pyrene 오염도가 0.66의 민감도 지수를 나타내어 본 연구의 다매체/다경로를 고려한 총 인체 노출량 예측에 있어서 가장 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

그 다음으로는 노출빈도(0.32), 실외 활동시의 호흡률(0.27), 토양에 의한 식물로의 분배계수(강우에 의해 손실되는 경우)(0.18), 실내활동 및 휴식시의 호흡률(0.17)에 관한 인자들이 다경로 인체 노출량 예측에 유의한 영향을 주었다. 그 밖의 영향 인자들로는 지표수의 benzo(a)pyrene 오염도(0.14),

노출기간(0.13), 매체간 전이계수로서 음용수 처리 과정에 의한 지표수의 오염 제거율(0.11)이 있었고, 실외공기에서 실내공기로의 오염전이 계수, 토양의 오염도, 음용수의 일일 섭취량에 대한 민감도 지수가 모두 0.04로 나타났다.

## 고 찰

Benzo(a)pyrene를 비롯한 PAHs의 발생 특성상, 여러 노출 매체 경로 중에서도 음식에 의한 인체 노출이 일일 총 인체 접촉율(total daily intake)의 약 97%를 차지한다는 보고가 있으며(Hattemer-Frey 등, 1991), Baghurst (1999)와 Knizie 등(1999)의 연구에서도 식품의 2차 조리 및 가공시 식품 중의 주성분인 탄화수소, 단백질, 지질 등이 분해되거나 육류의 지방이 열분해 되면서 다량 생성되는 benzo(a)pyrene 때문에, 식품의 2차 조리 및 가공에 의한 노출을 가장 큰 문제로서 제시하고 있다. 그러나, 이러한 음식의 조리 및 가공 과정에 의해 발생되거나 오염되는 문제는 개인의 식습관에 따른 변화가 매우 크며, 이러한 오염은 물질의 이화학적 특성에 의해 2차적으로 발생하는 것이기 때문에, 환경관리 관점에서의 실제적인 일차 환경매체의 범위에서는 다소 벗어나는 것으로 간주하였다. 또한, 본 연구의 초점은 환경오염에 의한 1차 환경매체의 오염으로부터 실제 노출매체로의 매체간 오염전이(inter-media transfer) 개념을 가지고 매체/경로별 인체 노출량을 예측하고자 하는 것으로서, 기존 연구들에서 주로 다뤄왔던 benzo(a)pyrene의 인체노출과 관련하여 식품의 조리 및 가공(2차오염)에 의한 인체로의 섭취노출은 고려하지 않았다.

대기, 지표수 및 토양의 환경매체에서의 오염도를 바탕으로 인체 접촉매체에서의 오염도를 예측한 결과, 실외 및 실내 공기의 평균 오염도는 각각  $3.66 \times 10^{-6} \text{ mg/m}^3$ ,  $3.48 \times 10^{-6} \text{ mg/m}^3$ 으로 산출되었다. 이는 우리나라 수원지역에서 측정되었던 대기 농도  $5.8 \times 10^{-7} \sim 2.54 \times 10^{-6} \text{ mg/m}^3$  (1990~1994년, 매년 측정)과 유사한 수준이었다(김성천 등, 1996). 그러나 외국의 시카고, 보스턴, 휴스턴, 런던 지역의 대기 중 benzo(a)pyrene의 농도( $2.0 \times 10^{-7} \sim 2.5 \times 10^{-5} \text{ mg/m}^3$ ) 보다는 다소 낮은 것으로 비교되었다(Odabasi 등, 1999).

한편, 음용수(수도수) 중 benzo(a)pyrene의 농도는  $5.75 \times 10^{-6} \text{ mg/l}$ 이었고, 지표 토양에서의 평균 오염도는  $4.22 \times 10^{-3} \text{ mg/kg}$ 으로 예측되었다. 태국의 Chiang-mai 지역에서의 토양 중 benzo(a)pyrene의 농도를 측정한 Amagai 등(1999)의 연구 결과를 보면, 기하평균  $2.02 \times 10^{-2} \text{ mg/kg}$ 으로 측정되어 우리나라보다는 높은 농도였다.

오염된 환경매체에 의한 식품에서의 오염도 경우, 농작물에서  $1.43 \times 10^{-5} \text{ mg/kg}$ , 육류에서는  $1.20 \times 10^{-4} \text{ mg/kg}$ 으로 예측되었으며, 이때 육류의 오염도가 농작물에 비해 약 10배가량 높게 나타났다. 이는 노출 모형을 구성하고 있는 수식에서 오염물질의 매체간 이동 및 생체내 축적에 대한 부분으로 매체간 오염전이 계수(TF)와 생체전환계수(biotransfer factor)를 적용한 예측 결과이자, 실제로도 가축이 오염된 공기, 물, 토양에 직접적으로 노출될 뿐만 아니라, 먹이 연쇄를 통해 오염된 토양에서 재배된 식물(또는 목초)을 다시 가축이 섭취하기 때문에 생체농축에 의한 영향으로 평가되었다. 그리스 산업지역에서 재배된 채소류에 대한 PAHs의 오염도 분석결과(Voutsas와 Samara, 1998), 양배추에서의 benzo(a)pyrene은  $1.4 \times 10^{-4} \text{ mg/kg}$ , 당근  $1.1 \times 10^{-4} \text{ mg/kg}$ , 부추  $1.5 \times 10^{-4} \text{ mg/kg}$ , 양상추  $2.8 \times 10^{-4} \text{ mg/kg}$ , 샐러드용 꽃상추  $2.4 \times 10^{-4} \text{ mg/kg}$ 으로 분석되었고, 또 다른 외국의 연구로서 200종의 식품 중 benzo(a)pyrene의 농도를 분석한 결과(Kazerouni 등, 2001), 쌀  $1.2 \times 10^{-4} \text{ mg/kg}$ , 당근  $1.5 \times 10^{-4} \text{ mg/kg}$ , 양배추  $4.7 \times 10^{-4} \text{ mg/kg}$ , 토마토  $1.9 \times 10^{-4} \text{ mg/kg}$ , 감자  $1.7 \times 10^{-4} \text{ mg/kg}$ 의 농도 수준을 보여 우리나라의 경우보다는 benzo(a)pyrene의 오염도가 높음을 알 수 있었다.

도시 거주 성인의 다매체/다경로 노출로 benzo(a)pyrene의 총 인체 노출량은 평균  $5.52 \times 10^{-7} \text{ mg/kg-day}$ 으로 산출되었으며, 이를 benzo(a)pyrene의 발암잠재력(carcinogenic potency:  $q1^* = 7.3 (\text{mg/kg-day})^{-1}$ ) (IRIS, 2003)을 이용하여 평생초과 발암위해도로 나타내면, 인구 백만 명당 약 4명( $4.03 \times 10^{-6}$ )의 수준인 것으로 추정되었다.

다매체/다경로를 고려하여 예측한 benzo(a)pyrene의 일일 평균 총 인체 노출량에 가장 큰 영향을 미치는 환경매체는 대기의 오염으로 분석되었다. 대기 오염에 의한 실내공기와 실외공기 오염에 의한 인체 노출량으로는 각각  $1.51 \times 10^{-7} \text{ mg/kg-day}$ 와

$1.42 \times 10^{-7}$  mg/kg-day로 산출되었으며, 이는 Yaffe 등(2001)의 연구 결과에서 제시되었던 공기 흡입에 의한 노출량 결과  $1.3 \times 10^{-7}$  mg/kg-day와도 유사하였다. 또한, 본 연구 결과에서도 보여졌듯이 피부접촉에 의한 노출량은  $6.99 \times 10^{-9}$  mg/kg-day로 다른 노출 경로들에 비해 가장 낮았으며, Los Angeles에서의 다매체 중 PAHs의 분석연구 결과에서도 음용수나 토양에 의한 피부노출량을 다른 노출경로에 비하여 상대적으로 미미한 수준으로서 보고 있다(Yaffe 등, 2001).

따라서, 식품의 가공 및 조리에서 의한 노출 경로를 제외한 benzo(a)pyrene의 다매체/다경로 인체 노출량 중 실내·외 공기 흡입에 의한 노출량의 기여율이 가장 높게 평가되었으므로, 효과적인 환경 관리 방안으로서 중점적인 benzo(a)pyrene의 대기 배출원 관리를 고려할 수 있을 것으로 사료된다.

다매체/다경로 노출 시나리오에 의해 구성된 benzo(a)pyrene의 다경로 인체 노출 모형을 보정하기 위하여 민감도 분석을 실시하였다. 그 결과 모형에 적용되었던 다양한 인자들(factors) 중에서 매체/경로별 인체 노출량 예측결과에 유의한 영향을 미치는 인자들로서 실내·외 공간에서의 노출시간 및 노출빈도, 환경매체(대기, 지표수, 토양) 중 benzo(a)pyrene의 오염도, 호흡률, 매체간 오염 전이 계수(실외 → 실내, 지표수 → 음용수, 토양 → 농작물), 생체전환계수, 물의 사용량 및 섭취량, 체표면적과 피부 노출율 및 흡수율 등이 도출되었다. 그 중 총 인체 노출량에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 대기 중 benzo(a)pyrene의 오염도로 분석되었다. 이와 같이, 민감도 분석을 통해 도출된 유의한 영향 인자들에 대해서 어떠한 대표치와 확률분포를 적용하느냐에 따라 인체 노출량 예측 결과가 좌우되기 때문에, 보다 예측력을 향상시키기 위해서는 이러한 인자값들에 대한 데이터 및 자료들이 충분히 보완되어야 할 것으로 판단되었다.

이러한 노출 변수들은 인체 노출 예측 모형에 있어서 결과예측에 중요한 구성요소이지만, 현재 우리나라 국민을 대상으로 한 인체 노출 지표변수들에 대한 연구결과나 자료가 미비하기 때문에, 본 연구에서는 식품섭취량, 음용수 섭취량, 체중, 피부노출율, 물사용량 및 노출시간을 제외한 대부분의 인체 노출 변수들은 미국 EPA에서 제안하고 있는

값들을 인용하였다. 따라서 현실적으로 다경로 인체 노출 모형에 의한 오염물질의 인체 노출량을 예측하기 위해서는 우리나라의 현실에 적합한 모형 개발도 중요하겠지만, 이러한 예측모형을 뒷받침해줄 수 있는 기초 자료에 대한 데이터베이스 구축이 무엇보다도 시급한 실정이다.

더 나아가 다경로 인체 노출 평가에 있어서 노출 인구 집단의 특성을 더욱 세분화하여 성별, 연령 등의 특성화된 기준에 따라 노출 시나리오를 가정하여 그에 따른 변수들을 차별성있게 적용함으로써, 보다 정확하고 신뢰성있는 예측 모형 개발을 위한 연구를 진행시켜야 할 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

- 김성천, 이태정, 김동술. 수원지역 PM-10 중 다환방향족 탄화수소의 농도 변화에 관한 연구, 한국대기보전학회지 1996; 12(3): 341-350.
- 보건복지부. Korea. Food Code, 1997.
- 서울대 환경대학원. 환경오염물질의 위해성 통합평가 및 시스템 개발 : 다중경로 노출량의 추정을 위한 유해오염물질의 다매체 동태 예측모형 개발, 중간보고서. 환경부, 2001.
- 연세대 환경공해연구소. 환경오염물질의 위해성평가 및 관리기술 : 수질오염물질의 위해성평가 및 관리기술. 환경부, 1996.
- 연세대 환경공해연구소. 환경오염물질의 위해성평가 및 관리기술 : 대기오염물질의 위해성평가 및 관리기술. 환경부, 1999.
- 연세대 환경공해연구소. 환경오염물질의 위해성평가 및 관리기술 : 환경오염물질의 위해성 통합평가 및 시스템 개발. 환경부, 2001.
- Amagai T, Takahashi Y, Matsushita H, *et al.* A survey on polycyclic aromatic hydrocarbon concentrations in soil in Chiang-mai, Thailand, Environment International 1999; 25(5): 563-572.
- Baghurst PA. Polycyclic aromatic hydrocarbons and heterocyclic aromatic amines in the diet: the role of red meat, Eur. J. Cancer Res. 1999; 8: 193-199.
- Brown HS, Bishop DR and Rowan CA. The role of skin absorption as a route of exposure for volatile organic compounds (VOCs) in drinking water. American Journal of Public Health 1984; 74(5): 479-484.
- Butler JD and Crossley P. An appraisal of relative airborne suburban concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons monitored indoors and outdoors, Sci. Total

- Environ. 1979; 11: 53–58.
- Collins JF, Brown JP, Dawson SV and Marty MA. Risk assessment for benzo(a)pyrene, *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 1991; 13: 170–184.
- Hattemer-Frey HA and Travis CC. Benzo-a-pyrene: environmental partitioning and human exposure, *Toxicology and Industrial Health* 1991; 7(3): 141–157.
- IARC. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans Polynuclear Aromatic compounds. part 1. vol 32. Lyon, France, 1983.
- Kazerouni N, Sinha R, Hsu CH, *et al.* Anaysis of 200 food items for benzo(a)pyrene and estimation of its intake in an epidemiology study, *Food and Chemical Toxicology* 2001; 39: 423–436.
- Knizie MG, Salmon CP, Pais P and Felton JS. Food heating and the formation of heterocyclic aromatic amine and polycyclic aromatic hydrocarbon mutagens/carcinogens. In impact of processing on food safety (Jackson *et al.*, Eds.). Kluwer Academic/Plenum, New York, 1999.
- KOSIS. Korean Statistical Information Sytem, 1995.
- KOSIS. Korean Statistical Information Sytem, 2000.
- KOSIS. Korean Statistical Information Sytem, 2001.
- Lee YA. Fate and transport of dioxin as predicted by a multimedia model in Seoul metropolitan area. Dept. Environmental Planning Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University, 1999.
- Lioy PJ, Waldman JM and Greenberg A. *et al.* The total human Environmental Exposure Study (THESS) to benzo(a)pyrene : comparison of the inhalation and food pathways. *Archives Environmental Health* 1998; 43(4): 304–312.
- McKone TE and Bogen KT. Uncertainties in health-risk assessment: an integrated case study based on tetrachloroethylene in California groundwater, *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 1992; 15: 86–103.
- McKone TE. Human exposure to volatile organic compounds in household tap water : The indoor inhalation pathway, *Environmental Science & Technology* 1987; 21.
- Odabasi M, Vardar N, Sofuoglu A, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Chicago air, *The Science of the Total Environment* 1999; 227: 57–67.
- Seoul Metropolitan Police Administration, 1999.
- Sexton K, Kleffman DE and Callahan MA. An introduction to the national human exposure assessment survey (NHEXAS) and related phase I field studies, *J. Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* 1995; 5(3): 229–232
- US EPA. CalTOX : A multimedia total exposure model for hazardous waste site–Technical Report. EPA–California, 1996b.
- US EPA. Exposure Factors Handbook Final Report, Report No. EPA 600/8–89/043. Office of Health and Environmental Assessment, Washington DC., 1989b.
- US EPA. Exposure factors handbook. volume I. General factors. EPA–ORD. EPA/PB98–124255. Washington DC., 1997.
- US EPA. Further Issues for Modeling the Indirect Exposure Impacts from Combustor Emission, Memorandum from M. Lorber and G. Rice, Office of Research and Development, Washington, DC., 1995a.
- US EPA. Human exposure model–II: User guide. EPA–Research Triangle Park, North Carolina., 1992b.
- US EPA. Human Health Evaluation Manual Supplemental Guidance: Standard Default Exposure Factors. OSWER Directive 9285.6–03. Office of Solid Waste and Emergency Response. Washington, DC., 1991.
- US EPA. Risk Assessment Guidance for Superfund. Volume I. Human Health Evaluation Manual (Part A). EOA–Office of Emergency and Remedial Response, EPA/540/1–89/002. Washington DC., 1989a.
- Voutsas D and Samara C. Dietary intake of trace elements and polycyclic aromatic hydrocarbons via vegetables grown in an industrial Greek area. *The Science of the Total Environment* 1998; 218: 203–216.
- Yaffe D, Cohen Y, Arey J, *et al.* Multimedia analysis of PAHs and Nitro-PAH daughter products in the Los Angeles Basin, *Risk Analysis* 2001; 21(2): 275–294.
- Yang JY, Shin DC, Park SE, *et al.* PCDDs, PCDFs, and PCBs concentrations in breast milk from two areas in Korea: body burden of mothers and implications for feeding infants, *Chemosphere* 2002; 46(3): 419–428.

## 부 록-A

- ABS* : absorption factor (dermal):equivalent to 0.1% (inorganics), 1.0% (organics) (unitless).  
*AF* : adherence factor (mg/cm<sup>2</sup>)  
*AT* : averaging time (days)  
*BR<sub>h</sub>* : high activity breathing rate (m<sup>3</sup>/day)  
*BR<sub>l</sub>* : light activity breathing rate (m<sup>3</sup>/day)  
*Bt (meat)* : biotransfer factor in meat relative to cattle-diet contaminant intake (day/kg[m])  
*BW* : body weight (kg)  
*C<sub>air</sub>* : concentration of the chemical in air (mg/m<sup>3</sup>)  
*CF* : unit conversion factor  
*C<sub>plg</sub>* : concentration of the chemical in plants (mg/kg)  
*C<sub>i</sub>* : concentration of the chemical in exposure medium *i* (mg/m<sup>3</sup>, mg/L, mg/kg)  
*C<sub>k</sub>* : concentration of the chemical in environmental medium *k* (mg/m<sup>3</sup>, mg/L, mg/kg)  
*C<sub>m</sub>* : concentration of the chemical on beef cattle exposed to the chemical in air, water, soil, plants (mg/kg[m])  
*C<sub>soil</sub>* : concentration of the chemical in surface soil (mg/kg)  
*C<sub>water</sub>* : concentration of the chemical in surface water (mg/L)  
*ED* : exposure duration (years)  
*EF* : exposure frequency (days/year)  
*ET<sub>z</sub>* : exposure time by water using in exposure space (hr/day)  
*F<sub>fv</sub>* : fraction of fruits and vegetables consumed that are exposed produce (unitless)  
*F<sub>s</sub>* : fraction rate of exposed skin (unitless)  
*HIF<sub>au</sub><sup>inh</sup>* : human intake factor of chemical of concern by an exposed individual via inhalation of contaminated ambient air (m<sup>3</sup>/kg-day)  
*HIF<sub>au</sub><sup>inh</sup>* : human intake factor of chemical of concern by an exposed individual via inhalation of contaminated drinking water (L/kg-day)  
*HIF<sub>dw</sub><sup>uptake</sup>* : uptake of chemical of concern by an exposed individual via dermal uptake with contaminated drinking water (L/kg-day)  
*HIF<sub>fv</sub><sup>ing</sup>* : human intake factor of chemical of concern by an exposed individual via ingestion of contaminated fruits, vegetables, and grains (kg[fv]/kg-day)  
*HIF<sub>ia</sub><sup>inh</sup>* : human intake factor of chemical of concern by an exposed individual via inhalation of contaminated indoor air (m<sup>3</sup>/kg-day)  
*HIF<sub>i</sub><sup>ing</sup>* : human intake factor of chemical of concern by an exposed individual via ingestion of contaminated exposure medium *i* (L/kg-day, kg[s]/kg-day, kg[m]/kg-day)  
*HIF<sub>ijk</sub>* : human intake factor from exposure medium *i* by route *j* attributable to environmental compartment *k* (m<sup>3</sup>/kg-day, L/kg-day, kg[i]/kg-day)  
*HIF<sub>s</sub><sup>uptake</sup>* : uptake of chemical of concern by an exposed individual via dermal uptake with contaminated surface soil (kg[s]/kg-day)  
*i* : exposure medium such as outdoor air, indoor air, drinking water, surface soil, plants and meats  
*I<sub>ibc</sub>* : ingestion of exposure medium *i* by beef cattle (m<sup>3</sup>/day, L/day, kg[s]/day, kg[fv]/day)  
*IR<sub>fv</sub>* : ingestion rate of fruits and vegetables (kg[fv]/day)  
*IR<sub>g</sub>* : ingestion rate of grains (kg[g]/day)  
*IR<sub>i</sub>* : ingestion rate of exposure medium (L/day, kg[s]/day, kg[m]/day)  
*ISR* : rate of exposure time in indoor (unitless)  
*k* : environmental medium such as ambient air, surface water, and surface soil  
*LADD<sub>baseline</sub>*, *LADD<sub>10%</sub>* : baseline and variation of LADD  
*LADD<sub>ijk</sub>* : lifetime average daily dose from exposure medium *i* by route *j* attributable to environmental compartment *k* (mg/kg-day)  
*MTE<sub>Z</sub>* : the mass transfer efficiency from water to air in exposure space (unitless)  
*SA* : available surface area (cm<sup>2</sup>/day)  
*SP* : skin permeability coefficient (m/hr)  
*TF<sub>(i→m)</sub>* : transfer factor from chemical of exposure medium *i* to beef cattle (m<sup>3</sup>/kg[m], L/kg[m], kg[s]/kg[m], kg[fv]/kg[m])  
*TF<sub>(k→i)</sub>* : transfer factor from chemical of environmental medium *k* to exposure medium *i*  
*VR<sub>z</sub>* : ventilation rate of exposure space (m<sup>3</sup>/hr)  
*W<sub>z</sub>* : water consumer in exposure space (L/hr)  
*X<sub>baseline</sub>*, *X<sub>10%</sub>* : baseline and variation of exposure factor  
*z* : exposure space such as bathroom or house  
*σ* : standard deviation of distribution for exposure factor