

## 홍수조절지 건설 후 사격장 주변지역의 위해성예측 사례연구

류혜림<sup>1</sup> · 한준경<sup>1</sup> · 남경필<sup>1\*</sup> · 배범한<sup>2</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부, <sup>2</sup>경원대학교 토목환경공학부

### Prediction of Potential Risk Posed by a Military Gunnery Range after Flood Control Reservoir Construction

Hyerim Ryu<sup>1</sup> · Joon Kyoung Han<sup>1</sup> · Kyoungphile Nam<sup>1\*</sup> · Bumhan Bae<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil, Urban and Geosystem Engineering, Seoul National University

<sup>2</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Kyungwon University

#### ABSTRACT

Risk assessment was carried out in order to improve the remediation and management strategy on a contaminated gunnery site, where a flood control reservoir is under construction nearby. Six chemicals, including explosive chemicals and heavy metals, which were suspected to possess risk to humans by leaching events from the site were the target pollutants for the assessment. A site-specific conceptual site model was constructed based on effective, reasonable exposure pathways to avoid any overestimation of the risk. Also, conservative default values were adapted to prevent underestimation of the risk when site-specific values were not available. The risks of the six contaminants were calculated by API's Decision Support System for Exposure and Risk Assessment with several assumptions. In the crater-formed-area(Ac), the non-carcinogenic risks(i.e., HI values) of TNT(Tri-Nitro-Toluene) and Cd were slightly larger than 1, and for RDX(Royal Demolition Explosives), over 50. The total non-carcinogenic risk of the whole gunnery range calculated to a significantly high value of 62.5. Carcinogenicity of Cd was estimated to be about  $10^{-3}$ , while that of Pb was about  $5 \times 10^{-4}$ , which greatly exceeded the generally acceptable carcinogenic risk level of  $10^{-4} \sim 10^{-6}$ . The risk assessment results suggest that an immediate remediation practice for both carcinogens and non-carcinogens are required before the reservoir construction. However, for more accurate risk assessment, more specific estimations on condition shifts due to the construction of the reservoir are required, and more over, the effects of the pollutants to the ecosystem is also necessary to be evaluated.

**Key words :** Explosives, Heavy metals, Military gunnery range, Risk assessment

#### 요 약 문

본 연구는 경기도 소재 모 사격장의 주요 오염물질 여섯 가지에 대하여 홍수조절지가 건설된 이후 사격장 주변지역의 위해성을 예측하기 위하여 수행되었다. 해당 지역의 주요 오염물질 중 인체에 독성이 있는 화약물질 3종과 중금속 3종을 대상물질로 선정하였으며, 오염의 정도와 토지의 이용용도에 따라 네 지역으로 나누어 평가를 실시하였다. 위해성이 과대평가되는 것을 피하기 위하여 대상지역의 인문사회학적 특성 및 지반환경공학적 특성을 기반으로 노출경로모델(Conceptual Site Model)을 작성하였으며 각 노출경로에 따른 오염물질 이동모델 및 위해성 평가는 API's DSS(American Petroleum Institute's Decision Support System)를 이용하였다. 수용체나 지역의 특성을 하나의 값으로 대표할 수 없는 경우 위해성이 과소평가되는 것을 방지하기 위하여 가장 안전한 값을 사용하였다. 위해성 예측 결과, 피탄지인 Ac 지역에서 TNT(Tri-Nitro-Toluene)와 카드뮴의 비발암위해도가 1을 조금 넘고, RDX(Royal Demolition Explosives)의 경우 50이 넘어, 대상지역 전체에 대한 총 비발암위해도는 62.828라는 매우 큰 값을 나타내었다. 한편, 발암위해도는 납이 약  $5 \times 10^{-4}$ , 카드뮴이 약  $1 \times 10^{-3}$ 으로, 일반적으로 받아들여지는 발암위해도의 적

\*Corresponding author : kpnam@snu.ac.kr

원고접수일 : 2006. 12. 26 게재승인일 : 2007. 1. 3

질의 및 토의 : 2007. 4. 30 까지

정수준인  $10^{-4}$ ~ $10^{-6}$ 에 비하여 5~10 배 정도 크게 평가되었다. 이러한 위해성평가 결과를 통하여, 해당지역에 홍수조절지를 건설하기 전에 비발암물질과 발암물질 모두에 대한 즉각적인 복원사업이 진행되어야 하며, 홍수조절지 건설 후에도 사격장이 계속 운영될 경우 적절한 오염물질의 관리정책이 필요함을 알 수 있었다.

**주제어** : 화학물질, 중금속, 사격장, 위해성평가

## 1. 서 론

위해성(risk)이란 다양한 환경매질에서 오염물질이 가지는 실질적인 유해성(hazard)을 의미하는 것으로, 대상 오염물질의 노출가능성과 수용체에 대한 이용성 평가를 포함하는 개념이다(Alexander, 1995). 위해성평가는 잠재적인 수용체에 대한 오염물질의 위해성을 정량적으로 평가하므로 환경관리 의사결정 과정에서 효과적이고 과학적인 근거를 제공한다. 때문에 오염물질 관리 및 복원전략 수립에 있어 그 중요성이 대두되고 있다(Khan and Husain, 2001; MacDonald, 2000; McGraph et al., 2004). 특히 군사지역은 중금속뿐만 아니라 2,4,6-trinitrotoluene(TNT), hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine(Royal Demolition Explosive, RDX), octahydro-1,3,5,7-tetranitro, 1,3,5,7-tetra-zocine(High Melting Explosive, HMX)와 같은 화학물질들로 오염되어 있는 경우가 많은데, 이들 오염물질은 토양 및 지표수와 지하수를 통한 유출 가능성이 있으며(Best et al., 1999), 포유류, 조류, 파충류, 양서류 등에 대한 섭취 독성이 보고된 바 있으며 인체나 생태계에 악영향을 미칠 가능성이 있음에도 불구하고(Johnson and McAtee, 2000; Salice and Holdsworth 2001; USACH PPM, 2001) 우리나라를 포함하여 여러 나라에서 아직 화학물질에 대한 환경기준이 미흡한 실정이다. 따라서 군 사격장 내 중금속은 물론, 화학물질에 대한 위해성평가가 필수적이다.

본 연구는 사격장 인근에 건설예정인 홍수조절지의 환경영향평가의 일환으로 실시되었고, 대상지역에 대한 개황조사 및 정밀조사를 통하여 얻은 결과를 바탕으로, 주변보다 농도가 상대적으로 높은 Cd, Cu, Pb 등 3종의 중금속과 사격장 지역에서 발견되기 쉬운 TNT, RDX, HMX 등 3종의 화학물질에 대하여 홍수조절지가 건설된 후의 상황을 예측하여 위해성을 평가함으로써 건설사업 전후의 오염토양의 복원 및 관리전략을 세우는 데 기초자료를 제시하고자 하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 대상지역 특성 (Site Characterization)

#### 2.1.1. 지역개황

노출경로를 결정하는데 필요한 대상지역의 인구, 토지

이용, 급수설비 등은 홍수조절지 건설사업에 대한 환경영향평가서를 바탕으로 조사하였다. 사격장이 위치한 군의 인구는 총 17,974 인, 인구밀도는 72.9 인/km<sup>2</sup>이며, 사격장이 위치한 면과 강 하류에 위치한 면의 인구는 각각 1,459 인, 4,569 인으로 조사되었다. 이 지역의 주요 산업은 농업과 축산업이며, 강 중상류역에서는 어업활동도 활발히 일어나고 있었다. 상수도 현황을 살펴보면 2002년 총인구의 88%에게 급수하는 것으로 조사되었고, 그 외에도 정수장과 취수장이 각 1개씩 있으며, 건설예정인 홍수조절지가 위치하는 지역 일대가 상수원 보호구역으로 지정되어 있었다. 한편, 홍수조절지 공사장에서 필요한 용수는 각 사무실, 숙소 등에서 사용되는 식수, 목욕용수 등의 생활용수와 골재생산 세척, 콘크리트 혼합, 양정 등에 필요한 공사용수로 구분된다. 급수설비 중 생활용수는 가설부지 주위의 대수층으로부터 지하수를 개발하여 공급하고 공사용수는 하천수를 펌프로 압송하여 저류조에 저장 후 자연급수 방식으로 공급하도록 하였다.

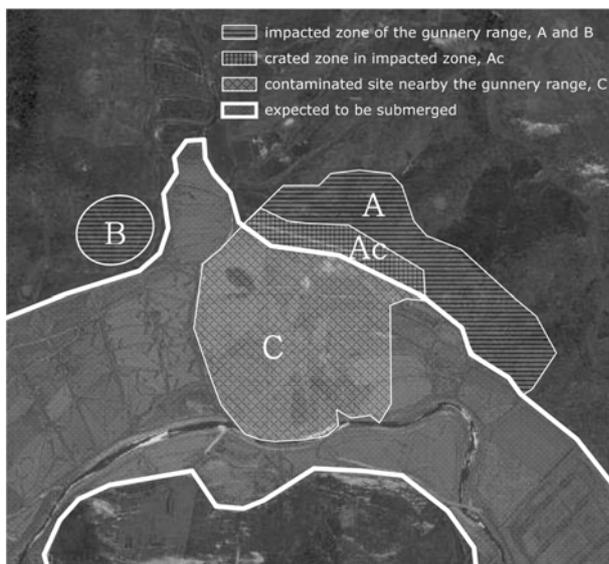
#### 2.1.2. 오염현황 및 평가대상물질 선정

사격장은 경기도 내에 위치하고 있으며 약 20여 년간 운용되어 왔다. 홍수조절지 건설사업 환경영향평가서에 의하면 사격장의 피탄지는 하천 하류 일부 입야지역에 분포하고 있으며, 포탄에 장약을 하지 않는 것으로 조사되어 화학류에 의한 토양 오염 등의 영향은 거의 없을 것으로 판단하였으나 조사 결과 구리와 납의 농도가 인근 토양에 비하여 높게 나타났다. 한편 중금속 중 Cd는 특히 식물에 대한 분배계수가 커서 낮은 농도에서도 쉽게 식물(곡물)을 통해 사람에게 흡수될 수 있다. 또한 사격장의 주요오염물질로 그 독성과 위해성이 높고 잔류성이 강한 HMX, RDX, TNT와 같은 고폍성 화학물질에 대한 고려가 없어, 오염도 조사 및 분석과 오염물질의 분포에 대한 자료가 전무한 상태이다. 이에 이 세 가지 화학물질과 Cd, Cu, Pb 등 중금속 3종을 대상오염물질로 선정하고 사격장 피탄지를 용도에 따라 Fig. 1과 같이 A, B, C의 세 구역으로 나누어 각각 29개소, 10개소, 26개소에서 정밀조사를 실시하였으며, 오염이 집중되었을 것으로 예상되는 A 구역 내에서 crater가 분포하는 지역을 다시 Ac로 구분하

**Table 1.** Concentrations of the target pollutants in soil, groundwater and surface water

Environmental media		Contaminants Concentration (mg/kg, mg/L)					
		Heavy metals			Explosives		
		Cd	Cu	Pb	TNT	RDX	HMX
Soil (mg/kg)	A	0.131	9.74	16.9	0.00340	0.722	0.295
	Ac	0.220	83.0	13.9	0.0580	13.4	0.470
	B	0.0735	3.12	3.48	0.00306	0.265	0.0743
	C	0.117	5.78	5.77	ND <sup>1</sup>	0.00203	0.0165
Groundwater (mg/L)		0.00157	0.00729	ND <sup>1</sup>	ND <sup>1</sup>	ND <sup>1</sup>	ND <sup>1</sup>
Surface water (mg/L)		ND <sup>1</sup>	0.00950	ND <sup>1</sup>	ND <sup>1</sup>	ND <sup>1</sup>	ND <sup>1</sup>

<sup>1</sup>ND: Not Detected



**Fig. 1.** Zoning of the site studied.

여 7개소에서 정밀조사를 실시하였다. 또한 사격장 피탄지 주변의 지하수와 지표수에 대한 오염도 조사도 실행되었다. 각 구역별 대상오염물질의 농도를 Table 1에 나타내었다.

2.1.3. 대상오염물질 특성 파악

오염물질의 물리화학적 특성에 따라 환경에서의 거동이 달라질 수 있으며, 이는 유효한 노출경로를 설정하는데 있어 중요하게 다루어진다. 따라서 신뢰할 수 있는 노출경로모델 (conceptual site model)을 작성하기 위해서는 현장 지반에 대한 조사 자료와 사회환경적 조건들과 함께 오염물질의 특성이 파악되어야 한다. 본 위해성 평가에서는 사격장 오염토양에서 용출 혹은 유출될 가능성이 있는 중금속(Cd, Cu, Pb) 및 화약물질(HMX, RDX, TNT) 6종을 위해성평가 대상물질로 선정하였으며, 각 물질의 물

리화학적 특성과 독성을 Table 2에 나타내었다(ATSDR, 1997; Johnson and McAtee, 2000; McGraph et al., 2004; USACHPPM, 2001). 중금속도 화약류와 마찬가지로 매우 작은 증기압과 헨리상수를 가지므로 공기 중으로 이동하는 양은 미미할 것이며, 상대적으로 큰 용해도를 가지고 있어서 지표수나 지하수로 이동할 가능성이 크다. 한편 카드뮴은 농작물, 특히 곡류에 섭취, 축적되는 양이 많다고 알려져 있어 농사를 주업으로 하는 지역에 대한 신중한 위해성 평가가 필요하다고 판단된다.

여섯 가지 대상오염물질 중 카드뮴과 납은 IRIS (Integrated Risk Information System)에 의하여 각각 B1, B2로 분류되는 발암물질에 해당한다(US EPA). 카드뮴의 경우 설치류에 대하여 흡입에 의한 발암성이 증명되었으며(Takenaka et al., 1983), 인간에게는 폐암 등을 유발할 수 있다는 제한적 증거가 있다(Thun et al., 1985). 납과 그 화합물은 섭취 등에 의한 경로를 통해 암이 발생할 수 있음이 동물실험으로 증명되었으며(Azar et al., 1973; Kasprzak et al., 1985; Koller et al., 1986; Van Esch and Kroes, 1969) 인체발암성도 일부분 증명되었다(Cooper and Gaffey, 1975). 그러나 납은 US EPA의 IRIS등에서도 SF 값이 제시되지 않고 있으므로, 본 위해성평가에서는 TOX-RISK 패키지를 이용하여 도출된 multistage 모델의 납의 단위 용량당 발생 가능한 발암잠재력( $3.91 \times 10^{-2}/(mg/kg \cdot day)$ )을 이용하였다(연세대학교 환경공해연구소, 1995).

본 연구에서는 발암물질 두 가지(Cd, Pb)에 대한 발암위해도와 모든 대상오염물질(TNT, RDX, HMX, Cd, Cu, Pb 등 6종)에 대한 비발암위해도를 평가하였다.

2.2. 노출경로모델 (Conceptual Site Model)

본 위해성평가에서는 유효하며 합리적이고 신뢰도가 높은 결과를 도출할 수 있는 노출경로만을 선택하여 평가를

**Table 2.** Physicochemical properties and toxicities of the target pollutants

Property	Unit	Heavy metals			Explosives		
		Cadmium	Copper	Lead	TNT	RDX	HMX
Molecular formula	–	Cd	Cu	Pb	C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> N <sub>3</sub> O <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> N <sub>6</sub> O <sub>6</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> N <sub>8</sub> O <sub>8</sub>
Molecular weight	g/mole	112.40	63.55	207.20	227.13	222.26	296.16
Melting point	°C	321	1083	327.5	80.1	205~206	276~280
Density	g/cm <sup>3</sup>	8.64	ND <sup>1</sup>	11.3	1.654	1.82	1.9
Water solubility	mg/L	123,000 (25°C)	421,000 (25°C)	9,580 (25°C)	130 (20°C)	38.4 (20~25°C)	5~6.63 (20~25°C)
Vapor pressure	mmHg	4.14 × 10 <sup>-9</sup> (25°C)	4.24 × 10 <sup>-9</sup> (25°C)	3.02 × 10 <sup>-9</sup> (25°C)	1.99 × 10 <sup>-4</sup> (20°C)	4.0 × 10 <sup>-9</sup> (20°C)	3.33 × 10 <sup>-14</sup> (20°C)
Henry's law constant	atm · m <sup>3</sup> /mole	0.0308 (25°C)	0.0245 (25°C)	0.0245 (25°C)	4.57 × 10 <sup>-7</sup> (20°C)	1.2 × 10 <sup>-5</sup> –	2.60 × 10 <sup>-15</sup> (25°C)
Organic carbon distribution coefficient	–	–	–	14.33 <sup>3</sup>	300	6.918	3.4674
Soil distribution Coefficient	–	37	2.47	ND <sup>1</sup>	ND <sup>1</sup>	ND <sup>1</sup>	ND <sup>1</sup>
Dispersion coefficient in air	cm <sup>2</sup> /s	ND <sup>1</sup>	ND <sup>1</sup>	ND <sup>1</sup>	0.064	0.074	0.063
Dispersion coefficient in water	cm <sup>2</sup> /s	ND <sup>1</sup>	ND <sup>1</sup>	ND <sup>1</sup>	6.71 × 10 <sup>-6</sup>	7.15 × 10 <sup>-6</sup>	6.02 × 10 <sup>-6</sup>
Carcinogen Class (IRIS)	–	B1	D	B2	C	C	D
Oral Reference Dose <sup>4</sup>	mg/kg · day	0.0005	0.0375	0.0004	0.0005	0.003	0.05
Inhalation Reference Dose	mg/kg · day	ND <sup>1</sup>	ND <sup>1</sup>	ND <sup>1</sup>	ND <sup>1</sup>	ND <sup>1</sup>	ND <sup>1</sup>
Oral Slope Factor	kg · day/mg	NA <sup>2</sup>	NA <sup>2</sup>	0.0391 <sup>5</sup>	NA <sup>2</sup>	NA <sup>2</sup>	NA <sup>2</sup>
Inhalation Slope Factor	kg · day/mg	6.3	NA <sup>2</sup>	0.0391 <sup>5</sup>	NA <sup>2</sup>	NA <sup>2</sup>	NA <sup>2</sup>

<sup>1</sup>ND: No data

<sup>2</sup>NA: Not Applicable

<sup>3</sup>US EPA(2000)에서 제공하는 EPI Suite의 PcKoc로 계산한 값

<sup>4</sup>Cu와 Pb에 대한 독성기준은 존재하지 않아 음용수 수질기준으로부터 안전한 값을 사용

<sup>5</sup>Multistage 모델에 의한 단위 용량당 95% 상한 발암잠재력(연세대학교 환경공해연구소, 1995)

실시하되, 선택권이 주어지는 상황에서는 보수적인 기본 값들을 사용하여 위해성이 과소평가되는 일이 없도록 하고자 하였다.

오염물질의 최종수용체는 사격장이 위치한 지역과 사격장 하류로부터 지표수와 지하수를 이용하는 일대의 전 지역의 주거인으로 가정하였다. 즉, 오염된 지표수 또는 지하수를 사용하는 농업, 어업, 축산업에 대해 고려해야 한다. 또한 이 지역은 상수도시설의 보급 외에도 하천표류수를 이용하는 취수정이 설치되어 있으므로 지표수를 생활용수와 식수로 이용하는 경우도 고려하였으며, 홍수조절지 공사 중 공사에 참여하는 사람들에게 생활용수로 지하수를 제공하는 것으로 되어 있으므로 지하수를 식수와 목욕에 사용하는 경우도 포함하였다.

정확한 위해성평가를 위해서는 수용체가 위치하는 지점의 오염농도를 입력하거나, 오염지역의 농도를 입력하되 오염지역으로부터 오염물질이 이동하여 수용체가 위치하는 지점까지 왔을 때의 오염농도를 예측할 수 있어야 한다. 정밀조사에서 사격장 피탄지 일대의 토양시료를 조사

한 결과 실트질 점토(silty clay)인 것으로 확인되었으며, 배수가 충분하지 않아 토양이 약간 젖어있는 상태인 것으로 조사되었다. 그러나 본 평가의 경우 홍수조절지가 건설되던 기후, 경관, 지형 등 주변의 가시적인 환경은 물론, 함수비, 유효공극률, 유기물함량 등 토양의 기본적인 물성과 지하수위, 투수계수 등 지반의 수리동역학적 조건들이 모두 변화하여 정확한 예측이 불가능하다고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 수용체가 사격장 피탄지 내에 있다고 가정하며, 농작물이나 가축들도 피탄지 내 오염지역의 토양에서 재배, 사육된다고 가정하였다. 이러한 가정은 최대한의 노출을 고려하는 것이므로 실제보다 과대평가되는 경향이 있을 것으로 생각된다.

위의 가정들을 토대로 하여 본 위해성평가를 위한 노출 경로모델(conceptual site model)을 Fig. 2에 나타내었다. 심토에 대한 오염농도 자료는 C 구역에 대한 것이며 이 지역은 홍수조절지 완공 시 수몰되는 지역이므로 지표수 오염에 대한 위해성평가로 대신하도록 한다. 대상지역인 마방사격장은 약 20년 간 운영되어 왔으며 앞으로도 현재

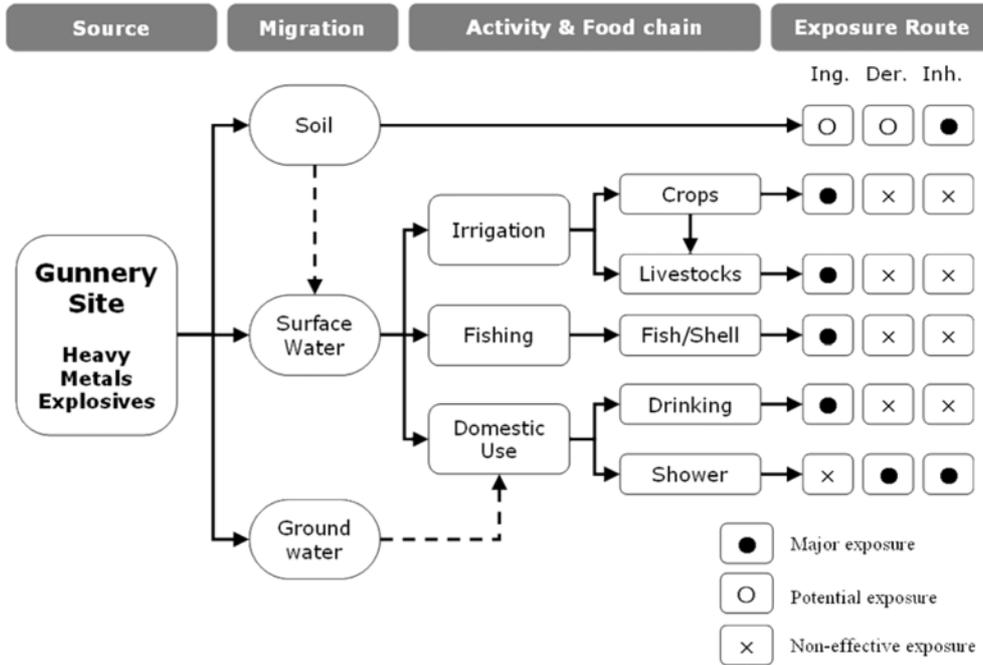


Fig. 2. Conceptual site model for the gunnery range.

와 같이 계속 운영된다고 가정하면, 현재의 각 매체별 오염농도가 어느 정도 평형을 이룬 상태라고 볼 수 있다. 따라서 매체 간의 물질이동을 고려하지 않고 정밀조사를 통하여 측정된 각 구역별 토양의 오염농도와 지표수, 지하수의 오염농도를 대상으로 위해성평가를 실시하였으며 평가 기간은 1년으로 설정하였다.

오염물질의 노출경로는 토양, 지표수, 지하수의 각 매체별로 구분할 수 있다. 여기에서 토양은 표토를 가리키며 토양으로부터의 노출은 섭취, 접촉, 흡입을 모두 고려한다. 섭취는 오염된 토양을 직접 섭취하는 경우이며, 접촉은 피부가 오염된 토양에 직접 접촉하는 경우로 특히 농업을 주로 하는 경우에는 주요노출경로가 될 수 있다. 본 연구에서는 오염지역 내에서 경작 등의 활동을 한다고 가정하였으나 실제로 발생하는 일은 아니므로 토양으로부터의 섭취와 접촉을 '잠재적 노출경로(potential exposure)'로 표시하였다. '잠재적 노출경로'란 실제 노출이 발생할 가능성이 낮거나, 노출된다 하더라도 그 노출량이 다른 노출경로에 비하여 실질적인 영향을 미치지 않는 경로를 가리킨다. 그러나 '잠재적 노출경로'에 대하여 어떤 계수를 적용하여 의도적으로 위해성을 낮게 평가하는 것은 아니다. 이러한 노출경로에 대해서도 '주요노출경로(major exposure)'와 마찬가지로 위해성이 엄격하게 평가되며, 최종적으로 이 경로를 선택하느냐 배제하느냐는 선택될 수 있는 사항이다. 본 평가에서는 '잠재적 노출경로'를 모두

포함한 최대노출(최악의 경우)을 가정하였다. 오염토양으로부터의 흡입은 오염물질이 휘발에 의해 증기로 흡입되는 것이 아니라 토양에 흡착한 상태에서 바람 등에 의해 발생할 수 있는 먼지를 통하여 흡입되는 것을 가리킨다. 이는 토양의 상태나 지역의 기후에 따라 달라질 수 있으나, 오염지역으로부터 멀리 떨어진 곳에서도 충분히 가능한 노출경로이므로 '주요노출경로'로 표시하였다.

지표수로부터의 노출경로는 농업용수와 생활용수를 포함하며, 대상지역에는 내수면 어업이 이루어지고 있으므로 낚시를 통한 어패류 섭취도 '주요노출경로'로 고려한다. 농업용수에서는 농업활동 중 지표수에 대한 직접적인 흡입과 섭취, 접촉이 가능하지만, 이는 생활용수에 포함되는 목욕(의도적인 접촉과 흡입)의 경우에 비하여 무시할 만한 것으로 생각되므로 배제하였다. 농업에서는 오염토양에서 자란 농작물의 섭취와 이러한 농작물과 오염된 지표수를 섭취하는 가축(육류)의 섭취를 '주요노출경로'로 설정하였다. 또한 생활용수로서 음용수(식수) 섭취와 목욕에 의한 접촉, 흡입을 '주요노출경로'로 고려하였다.

대상지역 일대는 상수도보급률이 높으며 하천수 취수장 등을 이용하므로 지하수를 실제 생활용수로 사용하는 경우는 없는 것으로 조사되었다. 그러나 홍수조절지 건설사업 중 공사에 참여하는 사람들에게 수질오염기준에 맞는 지하수가 공급될 예정이며, 우리나라 수질오염기준에는 아직 화약류에 대한 기준이 없으므로 오염된 지하수가 생활

**Table 3.** Parameters and values used for API's DSS

Properties	Unit	Zone				
		Ac	A	B	C	
Jury Model	Effective porosity	-	0.25	0.25	0.25	0.3
	Water content	(v/v)	0.19	0.223	0.231	0.3
	Soil bulk density	g/cm <sup>3</sup>	1.8	1.8	1.8	1.8
	Thickness of Incorporation	m	0.3	0.3	0.3	0.3
	Thickness of Incorporation	m	0.001	0.001	0.001	0.001
	Boundary layer thickness	cm	0.1	0.1	0.1	0.1
	Unsaturated zone depth	m	5	20	20	0.001
	Fraction organic carbon	-	0.034	0.058	0.082	0.054
	Infiltration	cm/yr	30	30	30	30
	Length	m	242.31	484.62	68.64	266.30
	Width	m	51.92	173.08	68.64	266.30
AT123D Model	Aquifer width and depth	-	infinite	infinite	infinite	infinite
	Hydraulic conductivity	m/yr	12.906	12.906	12.906	12.906
	Hydraulic gradient	m/m	0.1	0.1	0.1	0.1
	Longitudinal dispersivity	-	0.1	0.1	0.1	0.1
	Transverse dispersivity	-	0.02	0.02	0.02	0.02
	Vertical dispersivity	-	0.002	0.002	0.002	0.002
Box Model	Average wind speed	m/s	2.9	2.9	2.9	2.9
	Source area	m <sup>2</sup>	6014.5	40487.5	3700	50403
	Mixing height	m <sup>2</sup>	2	2	2	2
	Mixing width	m	77.55	201.22	60.83	224.51
Cowherd Particulate Emissions Model	Frequency of disturbance	day/month	30	30	30	-
	Fastest wind speed	m/s	4.3	4.3	4.3	-
	Erosion threshold wind speed	m/s	1	1	1	-
	Fraction of area with vegetative cover	-	0.99	0.99	0.99	-
	PE index	-	100	100	100	-

용수로 사용될 우려가 있다. 따라서 이를 고려하되 이는 일시적으로 발생하는 상황임을 감안하여 노출경로모델 (conceptual site model)에는 점선으로 표기하였다.

### 2.3. 위해성 산정 (Risk Evaluation)

본 위해성평가에 사용된 프로그램은 미국 석유회회 (American Petroleum Institute, API)에서 제작하여 제공하는 API's Decision Support System for Exposure and Risk Assessment(DSS)이다. 이 프로그램은 현장조사에서 측정된 토양의 농도를 입력하고 이로부터 현장특성과 오염 물질의 물리화학적 성질을 이용하여 지하수와 대기 중으로 이동하는 양을 측정하는 방법과, 현장조사를 통하여 최종 수용지점의 토양, 지하수, 대기의 농도를 직접 대입하여 위해성을 예측하는 방법을 사용할 수 있다. 본 연구에서 이

용한 오염물질 이동모델과 각 모델에 사용된 주요 파라미터들을 Table 3에 정리하였다. 또한 예측불가능한 변화에 대하여 위해성이 과소평가되는 것을 방지하기 위하여 오염 물질의 생물학적, 화학적 감소(decay)를 고려하지 않았다.

본 위해성 평가에서 사용된 노출계수들은 Table 4와 같다. 연세대학교 환경공해연구소(1995; 2001)에서 조사한 값들은 우리나라의 경우에 대한 노출계수이므로 이를 우선적으로 적용하였다. 노출빈도와 기간, 이용성 등에 대해서는 최다노출을 가정하여 가장 큰 값들(노출빈도 365일/년, 노출기간 30년, 이용성 100%)을 대입하였으며, 목욕 중 흡입량을 계산하는 데 필요한 값들은 API DSS 프로그램에서 제공하는 기본값(American Petroleum Institute, 1999)을 사용하였다. 각 물질의 피부투과계수는 US EPA(2000)에서 제공하는 DERMWIN으로부터 예측하였

**Table 4.** Main exposure parameters and factors

Category	Unit	Submitted value	References
Average body weight of a Korean adult	kg	65	연세대학교 환경공해연구소, 2001
Daily air inhalation of Korean	m <sup>3</sup> /day	20	연세대학교 환경공해연구소, 1995
Daily water ingestion of Korean	L/day	2	연세대학교 환경공해연구소, 1995
Daily soil ingestion	kg/day	2.1 × 10 <sup>-5</sup>	US EPA, 1996
Average body surface area of a Korean adult	cm <sup>2</sup>	15,326	연세대학교 환경공해연구소, 2001
Dermal contact coefficient	mg/cm <sup>2</sup>	1	US EPA, 1996
Skin permeability to inorganic substances	-	0.001	US EPA, 1996

**Table 5.** Carcinogenic risks of soil by cadmium and lead in the target site

		Soil			Food Chain			Carcinogenic Risk	
		Soil Dust	Surface Soil	Vegetables	Crops	Meats	Fish		
		Inhalation	Dermal Contact	Ingestion	Ingestion	Ingestion	Ingestion		
A	Cd	4.81 × 10 <sup>-4</sup>	NA <sup>1</sup>	NA <sup>1</sup>	NA <sup>1</sup>	NA <sup>1</sup>	NA <sup>1</sup>	4.81 × 10 <sup>-4</sup>	
	Pb	3.85 × 10 <sup>-4</sup>	1.36 × 10 <sup>-5</sup>	1.39 × 10 <sup>-7</sup>	NE <sup>2</sup>	NE <sup>2</sup>	1.07 × 10 <sup>-9</sup>	NE <sup>2</sup>	3.99 × 10 <sup>-4</sup>
Ac	Cd	3.11 × 10 <sup>-4</sup>	NA <sup>1</sup>	NA <sup>1</sup>	NA <sup>1</sup>	NA <sup>1</sup>	NA <sup>1</sup>	NA <sup>1</sup>	3.11 × 10 <sup>-4</sup>
	Pb	1.22 × 10 <sup>-4</sup>	1.12 × 10 <sup>-5</sup>	1.15 × 10 <sup>-7</sup>	NE <sup>2</sup>	NE <sup>2</sup>	8.80 × 10 <sup>-10</sup>	NE <sup>2</sup>	1.33 × 10 <sup>-4</sup>
B	Cd	8.16 × 10 <sup>-5</sup>	NA <sup>1</sup>	NA <sup>1</sup>	NA <sup>1</sup>	NA <sup>1</sup>	NA <sup>1</sup>	NA <sup>1</sup>	8.16 × 10 <sup>-5</sup>
	Pb	2.39 × 10 <sup>-5</sup>	2.80 × 10 <sup>-6</sup>	2.87 × 10 <sup>-8</sup>	NE <sup>2</sup>	NE <sup>2</sup>	2.20 × 10 <sup>-10</sup>	NE <sup>2</sup>	2.67 × 10 <sup>-5</sup>
C	Cd	NE <sup>2</sup>	NA <sup>1</sup>	NA <sup>1</sup>	NA <sup>1</sup>	NA <sup>1</sup>	NA <sup>1</sup>	NA <sup>1</sup>	NR <sup>3</sup>
	Pb	NE <sup>2</sup>	NE <sup>2</sup>	NE <sup>2</sup>	NE <sup>2</sup>	NE <sup>2</sup>	NE <sup>2</sup>	NE <sup>2</sup>	NR <sup>3</sup>

<sup>1</sup>NA: Not applicable (No slope factor or pathway-exposure factor)

<sup>2</sup>NE: Applicable, but non-effective exposure pathway

<sup>3</sup>NR: No Carcinogenic Risk (or acceptable risk)

**Table 6.** Carcinogenic risk of groundwater by cadmium in the target site

	Food Chain				Water			Carcinogenic Risk
	Vegetables	Crops	Meats	Fish	Drinking	Shower		
	Ingestion	Ingestion	Ingestion	Ingestion	Ingestion	Dermal Contact	Inhalation	
Cd	NA <sup>1</sup>	5.62 × 10 <sup>-4</sup>	5.62 × 10 <sup>-4</sup>					

<sup>1</sup>NA: Not applicable (No Reference dose or pathway-exposure factor)

다. DERMWIN은 물질의 화학구조와 용해도, 유기물에 대한 분배계수 등을 이용하여 피부투과계수를 예측하는 간단한 프로그램이다. 토양으로부터의 노출량에서 접촉 점착계수와 하루 중 토양 섭취량은 US EPA(1996)로부터 얻은 값을 사용하였다. 한편 오염토양에서 재배된 식물과 오염지역 내에서 이러한 식물과 오염된 지표수를 먹고 자란 가축을 사람이 먹을 경우, 오염된 지표수에 사는 물고기를 먹는 경우에 대한 섭취계수들은 조건이 유사한 타 지역의 생태계위해성 평가자료로부터 구하여 사용하였다 (unpublished data).

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 발암위해도(Carcinogenic Risk)

대상오염물질 여섯 가지 중 발암물질로 분류되어 있는 것은 카드뮴과 납이며, A, Ac, B, C 구역과 지하수에서 이 2종의 오염물질에 대한 발암위해도를 계산하여 Table 5와 6에 나타내었다. 정밀조사 결과, 지표수에서는 이 두 물질이 검출되지 않았다. 발암위해도는 암이 발생할 확률이라고 받아들일 수 있다. 즉 이 지역에서 카드뮴에 의하여 암이 발생할 확률은 0.1% 정도이며, 납에 의해 암이

발생할 확률은 그보다 더 낮은 0.05% 정도라고 말할 수 있다. 위해성에 근거한 복원전략을 수립할 경우, 발암위해성은  $10^{-4}$ ~ $10^{-6}$  이하로 설정하는 것이 바람직하다. 대상 사격장의 경우 특히 오염도가 높은 A 구역과 Ac 구역에서 토양먼지 흡입에 의한 발암위해성이  $10^{-4}$  이상으로 권장하는 기준보다 크게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 오염지역 중 C지역은 홍수조절지 건설 후 수몰될 것이므로 농업이나 축산업 등의 활동이 일어나지 않을 것이며, A, B, Ac 구역은 사격장이 운영되고 있는 지역이므로 역

시 직접적인 작물이나 가축의 생산은 이루어지지 않으며, 모든 대상지역에서 이러한 활동들이 발생한다고 하더라도 먹이사슬을 통한 발암위해성은 매우 낮게( $10^{-9}$  이하) 발생할 것으로 계산되었다. 한편 지하수를 목욕수로 사용할 경우에도 높은 발암위해성이 나타난다.

**3.2. 비발암위해도(Noncarcinogenic Risk)**

비발암위해도는 1보다 작은 값을 가지는 경우 안전하다고 간주한다. Table 7과 8은 오염물질별, 구역별, 노출경

**Table 7.** Calculated hazard quotients and hazard indexes of the target pollutants

		Soil			Food Chain			Hazard Index	
		Soil Dust	Surface Soil	Vegetable	Crop	Meat	Fish		
		Inhalation	Dermal Contact	Ingestion	Ingestion	Ingestion	Ingestion		
A	Cd	0.356	0.003	$\ll 10^{-3}$	NA <sup>1</sup>	0.575	$\ll 10^{-3}$	NE <sup>2</sup>	0.934
	Cu	NA <sup>1</sup>	0.013	$\ll 10^{-3}$	NA <sup>1</sup>	NA <sup>1</sup>	$\ll 10^{-3}$	NE <sup>2</sup>	0.013
	Pb	NA <sup>1</sup>	0.198	0.002	NA <sup>1</sup>	NA <sup>1</sup>	$\ll 10^{-3}$	NE <sup>2</sup>	0.200
	TNT	NA <sup>1</sup>	$\ll 10^{-3}$	$\ll 10^{-3}$	0.047	0.034	$\ll 10^{-3}$	NE <sup>2</sup>	0.081
	RDX	NA <sup>1</sup>	0.012	$\ll 10^{-3}$	1.669	1.198	$\ll 10^{-3}$	NE <sup>2</sup>	2.879
	HMX	NA <sup>1</sup>	$\ll 10^{-3}$	$\ll 10^{-3}$	0.021	0.024	$\ll 10^{-3}$	NE <sup>2</sup>	0.150
	Total								4.257
Ac	Cd	0.23	0.021	$\ll 10^{-3}$	NA <sup>1</sup>	0.964	$\ll 10^{-3}$	NE <sup>2</sup>	1.216
	Cu	NA <sup>1</sup>	0.108	0.001	NA <sup>1</sup>	NA <sup>1</sup>	$\ll 10^{-3}$	NE <sup>2</sup>	0.109
	Pb	NA <sup>1</sup>	0.163	0.002	NA <sup>1</sup>	NA <sup>1</sup>	$\ll 10^{-3}$	NE <sup>2</sup>	0.165
	TNT	NA <sup>1</sup>	0.006	$\ll 10^{-3}$	0.803	0.577	0.002	NE <sup>2</sup>	1.388
	RDX	NA <sup>1</sup>	0.214	0.002	30.877	22.175	$\ll 10^{-3}$	NE <sup>2</sup>	53.269
	HMX	NA <sup>1</sup>	$\ll 10^{-3}$	$\ll 10^{-3}$	0.033	0.089	$\ll 10^{-3}$	NE <sup>2</sup>	0.123
	Total								56.270
B	Cd	0.06	0.007	$\ll 10^{-3}$	NA <sup>1</sup>	0.323	$\ll 10^{-3}$	NE <sup>2</sup>	0.390
	Cu	NA <sup>1</sup>	0.004	$\ll 10^{-3}$	NA <sup>1</sup>	NA <sup>1</sup>	$\ll 10^{-3}$	NE <sup>2</sup>	0.004
	Pb	NA <sup>1</sup>	0.041	$\ll 10^{-3}$	NA <sup>1</sup>	NA <sup>1</sup>	$\ll 10^{-3}$	NE <sup>2</sup>	0.041
	TNT	NA <sup>1</sup>	$\ll 10^{-3}$	$\ll 10^{-3}$	0.042	0.030	$\ll 10^{-3}$	NE <sup>2</sup>	0.073
	RDX	NA <sup>1</sup>	0.004	$\ll 10^{-3}$	0.611	0.439	$\ll 10^{-3}$	NE <sup>2</sup>	1.055
	HMX	NA <sup>1</sup>	$\ll 10^{-3}$	$\ll 10^{-3}$	0.005	0.004	$\ll 10^{-3}$	NE <sup>2</sup>	0.009
	Total								1.572
C	Cd	NE <sup>2</sup>	NE <sup>2</sup>	NE <sup>2</sup>	NA <sup>1</sup>	NE <sup>2</sup>	NE <sup>2</sup>	NE <sup>2</sup>	NR <sup>3</sup>
	Cu	NA <sup>1</sup>	NE <sup>2</sup>	NE <sup>2</sup>	NA <sup>1</sup>	NA <sup>1</sup>	NE <sup>2</sup>	NE <sup>2</sup>	NR <sup>3</sup>
	Pb	NA <sup>1</sup>	NE <sup>2</sup>	NE <sup>2</sup>	NA <sup>1</sup>	NA <sup>1</sup>	NE <sup>2</sup>	NE <sup>2</sup>	NR <sup>3</sup>
	TNT	NA <sup>1</sup>	NE <sup>2</sup>	NR <sup>3</sup>					
	RDX	NA <sup>1</sup>	NE <sup>2</sup>	NR <sup>3</sup>					
	HMX	NA <sup>1</sup>	NE <sup>2</sup>	NR <sup>3</sup>					
	Total								NR <sup>3</sup>
HI of soil in the total gunnery range								62.099	

<sup>1</sup>NA: Not applicable (No Reference dose or pathway-exposure factor)  
<sup>2</sup>NE: Applicable but non-effective exposure pathway  
<sup>3</sup>NR: No Risk (either for no available data or for non-effective pathways or both)

**Table 8.** Calculated hazard quotients and hazard indexes of polluted water

		Food Chain				Water			Hazard Index
		Vegetable	Crop	Meat	Fish	Drinking	Shower		
		Ingestion	Ingestion	Ingestion	Ingestion	Ingestion	Dermal Contact	Inhalation	
GW	Cd	NA <sup>1</sup>	NA <sup>1</sup>	<< 10 <sup>-3</sup>	NE <sup>2</sup>	0.099	<< 10 <sup>-3</sup>	0.416	0.515
	Cu	NA <sup>1</sup>	NA <sup>1</sup>	<< 10 <sup>-3</sup>	NE <sup>2</sup>	0.006	<< 10 <sup>-3</sup>	NA <sup>1</sup>	0.006
	Total								0.521
SW	Cu	NA <sup>1</sup>	NA <sup>1</sup>	<< 10 <sup>-3</sup>	<< 10 <sup>-3</sup>	0.008	<< 10 <sup>-3</sup>	NA <sup>1</sup>	0.008
HI of water in the total gunnery range									0.529

<sup>1</sup>NA: Not applicable (No Reference dose or pathway-exposure factor)

<sup>2</sup>NE: Applicable but non-effective exposure pathway

로별로 비발암위해도를 합하여 정리한 것이다. 각각의 비발암위해도가 Hazard Quotient(HQ)이며, 이를 합한 값이 Hazard Index(HI)이다. Ac 구역의 TNT와 카드뮴에 대해서 비발암위해도가 1보다 약간 큰 값을 가지며 RDX에 대해서는 C를 제외한 모든 구역에서 1보다 큰 값, 특히 Ac 구역에서는 50을 넘는 매우 큰 값을 가짐을 알 수 있다. 사격장 피탄지 전체 지역에 대한 비발암위해도는 62.628로 매우 높은 값을 나타낸다. 발암위해도 결과에서 언급한 바와 같이 대상지역에서 직접적인 경작 및 가축사육이 이루어지지 않을 경우를 고려한다 하더라도, A, Ac, B 구역에서 각각 0.584, 0.747, 0.116으로 1보다 작은 값이 나오지만, 이를 합하면 다시 HI는 1.447이라는 큰 값이 나오는 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

홍수조절지 건설에 대한 환경영향평가의 일환으로 홍수조절지 건설예정 지역에 인접한 사격장에 대하여 Cd, Cu, Pb, TNT, RDX, HMX 등 여섯 가지 주요오염물질의 위해성을 평가하였다. 그 결과 사격장 피탄지 내 오염이 집중되어 있는 지역의 위해성이 심각한 것으로 나타났으며, 이 지역에 홍수조절지를 건설하고 저수지의 물을 생활용수로 사용할 경우 인체에 위해를 미칠 가능성이 있는 것으로 평가되었다. 따라서 이 지역에는 Ac, A, B 구역을 중심으로 카드뮴과 TNT, RDX 등에 대한 정화가 시급하다고 판단된다. 비발암위해성을 낮추는 것을 목표로 여섯 가지 오염물질에 대한 정화를 실시하면 발암위해성은 충분히 낮은 값이 될 것으로 예상된다.

한편 정밀조사 당시 C 구역은 논 지역으로 이 지역에서 검출된 오염물질들은 사격장 피탄지로부터 유출된 지표수에 의한 것으로 판단되었으며, Table 1에서 볼 수 있

는 바와 같이 그 농도가 상당히 높은 편이다. 그럼에도 불구하고 수몰예정지역인 C 구역에서는 모든 오염물질에 대하여 위해성이 없는 것으로 나타났는데, 이는 토양으로부터 지표수로 이동하는 정도가 매우 낮고, 대규모 저수지의 건설로 인하여 오염물질의 농도가 희석될 뿐 아니라, C 구역이 수몰된 후에는 대부분의 노출경로가 차단되기 때문이다.

본 연구에서는 환경영향평가를 위하여 오염지역을 조사하는 과정에서 위해성평가에 대한 사항들이 충분히 고려되지 않아 지역특성을 반영할 수 있는 자료가 부족하였다. 또한 홍수조절지가 완성되었을 경우에 대하여 위해성을 평가하였는데, 이러한 경우 미래의 환경조건이 어떻게 변화할 지에 대한 충분한 예측이 필요하다. 뿐만 아니라, 이 지역에 살고 있는 동식물들 생태계에 대한 위해성평가 역시 함께 진행되어야 할 것이다.

#### 사 사

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 우수연구센터지원사업(R11-2003-006-03003-0)으로 수행되었으며 서울대학교 공학연구소의 기술적 지원에도 감사 드립니다.

#### 참 고 문 헌

건설교통부, 한국수자원공사, 2005, 군남홍수조절지 건설사업 환경영향평가서(초안), 건설교통부, 서울.

연세대학교 환경공해연구소, 1995, 환경위해성평가 및 관리기술 : 수질오염물질의 위해성평가 및 관리 기술, 환경부, 서울.

연세대학교 환경공해연구소, 2001, 환경위해성평가 및 관리기술 : 환경오염물질의 위해성 통합 평가 및 시스템 개발, 환경부, 서울.

Alexander, M., 1995, How toxic are toxic chemicals in soil?,

*Environ. Sci. Technol.*, **29**(11), 2713-2717.

American Petroleum Institute, 1999, API's Decision Support System for Exposure and Risk Assessment (DSS) Version 2.0.

Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 1997, Toxicological Profile for HMX, U.S. Department of Health and Human Services, Atlanta, GA.

Azar, A., Trochimowicz, H.J., and Maxfield, M.E., 1973, Review of lead studies in animals carried out at Haskell Laboratory-Two year feeding study and response to hemorrhage study. In: Barth D., Berlin, A., Engel, R., Recht, P. and Smeets, J. Ed. Environmental Health Aspects of Lead, Proceedings International Symposium, October 1972, Amsterdam, The Netherlands. Commission of the European Communities, Luxembourg, 199-208.

Best, E., Sprecher, S., Larson, S., Fredrickson, H., and Bader, D., 1999, Environmental behavior of explosives in groundwater from the Milan Army Ammunition Plant in aquatic and wetland plant treatments. Removal, mass balances, and fate in groundwater of TNT and RDX, *Chemosphere*, **38**, 3383-3396.

Cooper, W.C. and Gaffey, W.R., 1975, Mortality of lead workers, Proceedings of the 1974 Conference on Standards of Occupational Lead Exposure, J.F. Cole, Ed., February, 1974, Washington, DC. *J. Occup. Med.* **17**, 100-107.

Johnson M.S. and McAtee M.J., 2000, Wildlife Toxicity Assessment for 2,4,6-Trinitrotoluene, U.S. Army Center for Health Promotion and Preventive Medicine (USACHPPM) Project Number 39-EJ-1138-00, Aberdeen Proving Ground, MD.

Kasprzak, K.S., Hoover, K.L., and Poirier, L.A., 1985, Effects of dietary calcium acetate on lead subacetate carcinogenicity in kidneys of male Sprague-Dawley rats, *Carcinogenesis*, **6**(2), 279-282.

Khan, F.I. and Husain, T., 2001, Risk-based monitored natural attenuation-a case study, *J. Hazard. Mater.*, **B85**, 243-272.

Koller, L.D., Kerkvliet, N.I., and Exon, J.H., 1986, Neoplasia induced in male rats fed lead acetate, ethyl urea and sodium nitrate, *Toxicol. Pathol.*, **13**, 50-57.

MacDonald, J.A., 2000, Evaluating Natural Attenuation for Groundwater Cleanup, *Environ. Sci. Technol.*, **34**, 346A-353A.

McGraph, D., Zhang, C.S., and Carton, O., 2004, Geostatistical analyses and hazard assessment on soil lead in Silvermines, area Ireland, *Environ. Pollut.*, **127**, 239-248.

Salice, C.J. and Holdsworth, G., 2001, Wildlife Toxicity Assessment for 1,3,5-Trinitrohexahydro-1,3,5-Triazine (RDX), U.S. Army Center for Health Promotion and Preventive Medicine (USACHPPM), Project Number 39-EJ1138-01B, Aberdeen Proving Ground, MD.

Takenaka, S., Oldiges, H., Konig, H., Hochrainer, D., and Oberdoerster, G., 1983, Carcinogenicity of cadmium aerosols in Wistar rats, *J. Natl. Cancer Inst.*, **70**, 367-373.

Thun, M.J., Schnorr, T.M., Smith, A.B., and Halperin, W.E., 1985, Mortality among a cohort of U.S. cadmium production workers: An update, *J. Natl. Cancer Inst.*, **74**(2), 325-333.

US Army Center for Health Promotion and Preventive Medicine (USACHPPM), 2001, Wildlife Toxicity Assessment for HMX, Project Number 39-EJ-1138-01E, Aberdeen Proving Ground, MD.

US EPA, Updated Monthly, Integrated Risk Information System (IRIS), Environmental Protection Agency, National Center for Environmental Assessment, Office of Research and Development, OH, USA.

US EPA, 1996, CalTOX: A multimedia total exposure model for hazardous waste site-Technical Report.

US EPA, 1998, Health advisory for octahydro-1,3,5,7-tetranitro, 1,3,5,7-tetrazocine (HMX), PB90-273525, Prepared by the Office of Drinking Water, Washington, DC, for the U.S. Army Medical research and Development Command, Fort Detrick, Frederick, MD.

US EPA, 2005, EPI Suite v3.12, Office of Pollution Prevention Toxics and Syracuse Research Corporation (SRC).

Van Esch, G.J. and Kroes, R., 1969, The induction of renal tumors by feeding of basic lead acetate to mice and hamsters, *Br. J. Cancer*, **23**, 265-271.