환경영향평가 제18권 제1호(2009) pp.11~19

연구논문

소각로 건설사업에 대한 건강영향평가 사례연구

- 중금속 흡입에 따른 인체 위해성 평가 -

김영하* · 최상기** · 이영수**

한국환경자원공사*, 한국환경정책 · 평가연구원**

(2008년 12월 1일 접수, 2009년 1월 13일 승인)

A Case Study of Health Impact Assessment on Incinerator Construction Project

- Human Risk Assessment due to Inhalation Exposure to Heavy Metals -

Youngha Kim* · Sangki Choi** · Youngsoo Lee**

Korea Environment & Resources Corporation*, Korea Environment Institute**

(Manuscript received 1 December 2008; accepted 13 January 2009)

Abstract

We conducted human risk assessment due to inhalation exposure to heavy metals emitted from incinerator.

The process of health impact assessment(HIA) on incinerator is as follows: The first step is to presume and calculate the amount of heavy metals emitted using emission factor. The second step is to conduct an exposure assessment using the K-SCREEN model which is used for predicting the concentration in a conservative method. The last step is to carry out a risk assessment on carcinogenic and non-carcinogenic substances.

This study revealed that rank of carcinogenic human risk was Cr^{+6} > As > Ni > Cd, and values of human risk assessment on carcinogenic and non-carcinogenic substances is lower than the US criteria for risk assessment except Cr^{+6}.

It is expected that the technique of HIA, especially human risk assessment on heavy metals, would be applied to the incinerator construction project. In addition, more systematic studies are needed to overcome some weak points and limits found in this study.

Keywords : HIA, Incinerator, Heavy Metals, Inhalation Exposure, Human Risk Assessment

Corresponding Author: Youngsoo Lee, Korea Environment Institute, 290 Jinheungno, Eunpyeong-gu, Seoul, 122-706, Korea Tel: 82-2-380-7657 Fax: 82-2-380-7744 E-mail: leeys@kei.re.kr

I. 서 론

OECD에서는 환경오염에 따른 질병이 총 의료비에서 차지하는 비중을 현재 2~6%로 추정하고 있으며 향후 급격하게 증가할 것으로 예상하고 있다. 우리나라 역시 2015년에 전체 인구의 약 12.9%가 65세 이상의 고령화 인구로서 환경오염에 취약한 노인계층이 증가할 것으로 전망되고 있다. 이처럼 건강과 환경이 밀접한 관계가 있음이 밝혀지면서 세계보건기구(WHO), 세계은행(World Bank) 등의 국제기구에서는 1980년대 초반부터 건강영향평가(Health Impact Assessment, HIA)의 실시 및 활성화를 위한 노력을 시작하였다(환경부, 2007a).

건강영향평가제도는 정책, 계획, 프로그램, 프로젝트 등이 인체 건강에 미치는 영향을 사전에 평가하여 의사결정권자의 의사결정에 도움을 주기 위한 제도로서 세계보건기구나 영국, 캐나다, 호주, 미국, EU 등에서 활용하고 있다.

과거 우리나라의 환경정책은 더러워진 공기, 물, 토양 등을 깨끗하게 치유하는 데 중점을 두어 오염매체별로 수립되어 왔다. 그러나 최근에는 사람 건강을 중심으로 사전예방적 차원에서 정책을 수립하고 국민의 참여와 협력을 강화하는 방향으로 정책의 패러다임을 전환하였으며, 지난 2008년 2월에는 국내 건강영향평가제도 시행의 근거가 되는 「환경보건법」이 국회를 통과하였다.

동 법 제13조(건강영향 항목의 추가 · 평가 등) 제1항의 규정에 따르면 사전환경성검토 또는 환경영향평가의 대상이 되는 행정계획 및 개발사업 중 대통령령으로 정하는 행정계획 및 개발사업에 대하여는 환경유해인자가 국민건강에 미치는 영향을 추가하여 평가하도록 하는 건강영향평가제도가 2010년부터 시행될 예정이다. 또한, 2008년 9월 환경부에서 입법예고한 「환경보건법 시행령안」 별표 1에 따르면 건강영향 검토 · 평가 대상으로 8개 대상사업[1]을 선정하고 있다. 이러한 사업들에 대한 건강영향평가가 효율적으로 이루어지기 위해서는 과학적인 평가방법을 미리 구축할 필요가 있다.

인체위해성 평가(human risk assessment)는 어떤 유해오염물질에 노출되어 나타날 수 있는 인간의 건강피해 확률을 추정하는 과학적인 과정이라고 정의할 수 있으며, 단순히 환경 중 오염도를 위해도로써 알기 쉽게 수치적으로 제시하는 과정만이 아니라 오염물질의 발생에서부터 인체로의 영향까지를 통계학적, 독성학적, 수학적, 사회정책 및 경제학적 측면 등을 모두 고려하여, 정책 결정자들과 일반대중이 과학적 기반 위에서 합일점을 찾도록 하는데 과학적 근거로 제시될 수 있는 방법론이다(이진수 등, 2005). 가장 보편적으로 받아들여지고 있는 위해성평가 방법은 미국 국가연구위원회(National Research Council; NRC)에 의해 제안되었는데(NRC, 1983), 이는 오염 물질들의 독성 영향을 규명하는 유해성 확인(hazard identification), 오염물질에 대한 노출의 강도, 빈도, 기간을 추정하는 노출 평가(exposure assessment), 오염 정도와 유해 영향 정도의 상관 관계를 규명하는 용량-반응 평가(dose-response assessment) 및 노출에 대한 인간 건강의 영향을 평가하는 위해도 결정(risk characterization) 등의 4단계로 구성되어 있다.

건강영향평가 대상사업 중의 하나인 소각장은 다이옥신 및 중금속, 유기화합물, 미세입자 등이 배출되어 인체 건강에 미치는 영향이 크다고 할 수 있다. 특히, 소각장 연돌에서 배출되는 소각연기 내에는 잘 분해되지 않고 건강에 큰 영향을 미칠 수 있는 납, 카드뮴, 수은 등의 중금속이 포함되어 있다. 소각로에서 배출되는 수은은 혈압 상승, 고혈압 등 심혈관 질환이나 기형과 같은 발육장애, 신경장애, 암 등을 유발하는 것으로 보고되고 있고, 카드뮴은 흡입을 통해 암을 유발하거나 폐 기능을 손상시킬 수 있으며, 고농도에 노출 시 빈혈이나 위에 자극을 줄 수 있다고 보고되고 있다(Pearl Moy, 2005).

이처럼 소각 쓰레기 내에 존재하는 유독성 중금속의 심각성이 알려졌음에도 불구하고 소각시설의 전체 위해도에서 중금속이 차지하는 비중 또는 소

1) 도시개발사업, 산업입지 및 산업단지의 조성사업, 에너지개발사업, 도로건설사업, 수자원 개발사업, 철도건설사업, 공항건설사업, 폐기물처리시설 · 분뇨처리시설 및 축산폐수공공처리시설의 설치사업이 이에 해당됨.

각연기 내의 중금속 농도에 대해 발간된 자료는 매우 제한적이다. 다만, 전 세계적으로 소각은 대기로 배출되는 중금속의 주원인이 되고 있으며, 1990년 유럽연합 내에서 소각으로 인한 카드뮴의 배출량은 8%, 수은은 16% 정도를 차지하는 것으로 추정된 바 있으며, 46톤의 크롬과 300톤이 넘는 납이 배출되었음이 보고된 바 있다. 또한, 네덜란드의 보고에 따르면 1990년~1995년 사이 도시고형폐기물(MSW) 소각장의 카드뮴, 수은 배출량은 소각장의 현대화로 인해 크게 줄었으며, 이 기간동안 네덜란드에서 대기로 배출되는 카드뮴 총량은 44%에서 13%로 수은은 53%에서 11%로 줄었다는 보고가 있다(쓰시협, 2002).

본 연구에서는 향후 추진될 건강영향평가제도의 효율적인 운영에 도움을 주기 위하여 소각로에서 배출되는 중금속의 호흡노출로 인한 인체 위해성 평가를 실시하여 위해성 평가 방법론의 건강영향평가에로의 적용 가능성 및 한계점 등을 살펴보았다.

II. 연구방법

1. 대상소각장 개요

연구의 대상은 "○○시 자원회수시설 민간투자시설사업"으로 일 평균 소각용량이 36톤(1.5톤/hr)인 중규모 소각로 1기를 설치하는 사업이다. 소각방식은 스토커식 방식이며 NOx 저감시설은 무촉매탈질설비(SNCR), 산성가스 제거시설은 반건식반응기(SDR), 분진 및 중금속 제거시설로는 여과집진시설(백필터)가 계획되어 있다.

2. 연구 방법

소각로에서 배출되는 중금속의 호흡노출로 인한 인체 위해도를 평가하기 위해, 첫째, 환경부(2004)에서 제시하고 있는 생활폐기물 스토커 소각로 연돌에서의 중금속 배출계수를 활용하여 발생량을 산정하였다. 두 번째로 최악 기상조건을 선정하여 농도를 보수적(Conservative)으로 계산하는 K-SCREEN 모델을 이용하여 소각시 배출되는 중금속이 주변지역에 미치는 확산농도를 예측하였다. 마지막으로 위해성 평가를 수행하였는데 발암성 물질에 대해서는 호흡단위위해도(inhalation unit risk)에 대기확산모델에 의해 예측된 예측농도를 곱하여 발암위해도(Cancer Risk; CR)를 계산하였고, 비발암성 물질에 대해서는 위해도지수를 계산하였다.

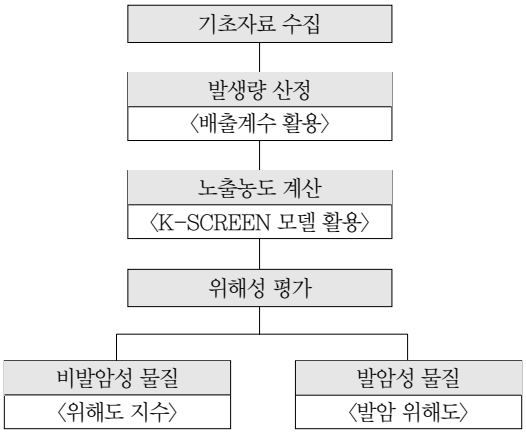

그림 1. 연구 흐름도

III. 연구결과

1. 중금속 배출량 산정

소각로에서 배출되는 중금속의 배출량 산정을 위해서 환경부에서 제시한 생활폐기물 소각로 연돌에서의 중금속 배출계수를 활용하였다(환경부, 2004). 소각시설에 대해 환경부에서는 생활폐기물 배출계수 외에 지정폐기물 소각시설 연돌에서의 오염물질 배출계수 등도 제시하고 있으며, 스토커, 로타리 킬른, 분무연소 등 소각 방식별로 배출계수를 각기 다르게 산정해 두고 있다. 이러한 자료들은 향후 폐기물 성상별, 소각 방식별로 배출되는 오염물질의 발생량을 산정할 경우에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 본다.

생활폐기물 소각시설에서 배출되는 중금속 배출량은 연간 소각되는 총량에 각각의 중금속 배출계수를 곱하여 산출할 수 있다.

배출량(kg/년) = 소각량(톤/년) × 배출계수(kg/톤)

표 1. 생활폐기물 스토커 소각로 연돌에서의 중금속 배출계수

오염물질	방 지 시 설	배출계수 [kg/폐기물소각량(ton)]
As	전기집진시설/흡수시설	2.623E-04
Cd	흡수시설/여과집진시설	1.574E-04
	전기집진시설/흡수시설	5.008E-04
Cr	흡수시설/여과집진시설	3.525E-04
	전기집진시설/흡수시설	1.140E-03
Cu	전기집진시설/흡수시설	4.946E-04
Hg	전기집진시설/흡수시설	7.096E-04
Ni	흡수시설/여과집진시설	1.626E-04
	전기집진시설/흡수시설	3.532E-03
Pb	흡수시설/여과집진시설	1.579E-04
	전기집진시설/흡수시설	4.902E-04
Zn	전기집진시설/흡수시설	6.816E-04
	흡수시설/여과집진시설	9.110E-04

본 연구에서는 소각량 산정시 하루 24시간, 일년 내내 소각시설을 가동하는 것으로 가정하여 매우 보수적으로 배출량을 산정하였으며, 향후 소각로에 설치 예정인 저감시설을 고려하여 배출계수를 선별적으로 활용하였다. 단, 비소, 구리, 수은에 대해서는 여과집진시설을 설치했을 경우에 대한 배출계수가 따로 정리되어 있지 않아 부득이 전기집진시설을 설치했을 경우에 대한 배출계수를 활용하였다[2]. 이를 토대로 배출량을 산정해 본 결과, 아연, 수은, 구리, 크롬 순으로 배출량이 많았으며, 이때 아연의 배출량은 0.12E+02(kg/년)이었다. 보다 구체적인 배출량 산정결과는 표 2와 같다.

2. 노출평가

1) 영향예측 대상지역

사업 시행으로 인한 영향예측은 사업지구 인근 1,500m 이내에 위치하고 있는 주거지역 5개 지점을 대상으로 하였으며, 대상지역과 사업지구와의 이격거리, 사업지구로부터의 위치, TM좌표 등은 아래 표에 나타내었다.

표 3. 영향예측 대상지역

구 분	이격거리 (m)	사업지구로 부터의 위치	TM좌표(km)	
			X	Y
① A지역	1,075	북측	126.935	348.432
② B지역	560	동측	127.141	347.606
③ C지역	1,235	남측	126.270	346.216
④ D지역	1,040	서측	125.578	347.356
⑤ E지역	1,085	북측	126.111	348.364

주) 이격거리는 대상사업 부지 경계로부터의 직선거리임.

2) K-SCREEN 모델 입력조건

"○○시 자원회수시설 민간투자시설사업"에서 소각로 건설에 따른 중금속 오염물질의 주변지역에로의 영향을 예측하기 위해 대기확산모델 중 대표적인 스크리닝 모델인 K-SCREEN 모델을 활용하였다. K-SCREEN 모델은 최악의 기상을 선정하여 보수적인 농도를 예측하는 비교적 간단한 모델로

2) 일반적으로 소각시설에서 배출되는 중금속은 전기집진시설보다 여과집진시설을 설치했을 경우 제거율이 높은 것으로 알려져 있어, 전기집진시설에 대한 배출계수 활용은 여과집진시설에 대한 배출계수를 활용하는 것보다 보수적(conservative)으로 평가된다고 할 수 있음.

표 2. 소각로 중금속 배출량 산정 결과 (소각량(톤/년): 13,140)

오염물질	방 지 시 설	배출계수[kg/톤]	배출량(kg/년)	배출량(g/s)
As	전기집진시설/흡수시설	2.623E-04	0.345E+01	0.109E-03
Cd	흡수시설/여과집진시설	1.574E-04	0.207E+01	0.656E-04
Cr	흡수시설/여과집진시설	3.525E-04	0.463E+01	0.147E-03
Cu	전기집진시설/흡수시설	4.946E-04	0.650E+01	0.206E-03
Hg	전기집진시설/흡수시설	7.096E-04	0.932E+01	0.296E-03
Ni	흡수시설/여과집진시설	1.626E-04	0.214E+01	0.678E-04
Pb	흡수시설/여과집진시설	1.579E-04	0.207E+01	0.658E-04
Zn	흡수시설/여과집진시설	9.110E-04	0.120E+02	0.380E-03

서, 실제로 발생할 수 있는 최악의 경우를 예측한다는 점이 중요한 의미를 갖는다. 또한, 동 모델은 기상 입력자료를 필요로 하지 않으며, 배출조건과 간단한 지형조건만으로 예측결과를 제공하기 때문에 현지에서의 기상측정이나 기상자료 수집을 위한 시간과 비용을 절감하는 동시에, 보수적인 계산을 하기 때문에 사업 시행으로 인한 최악조건을 산정한 결과를 얻을 수 있다는 장점이 있다(KEI, 1998).

K-SCREEN 모델을 실행하기 위해서는 여러 가지 입력조건들을 설정해 주어야 하는데 본 연구에서는 다음과 같은 모델 입력조건을 적용하였다.

① 배출원 형태: 점오염원
② 대상오염물질
 – 비소, 카드뮴, 크롬, 니켈, 납, 구리, 수은, 아연
③ 배출량: 환경부 배출계수 활용
④ 농도 계산 지점: 영향예측 대상지역(A, B, C, D, E지역)의 이격거리 적용
⑤ 굴뚝 높이: 30m
⑥ 굴뚝 내부 반경: 0.7m
⑦ 굴뚝가스 배출 속도: 16m/s
⑧ 배출가스 온도: 421K
⑨ 주변공기 온도: 290K(주변대기온도를 17℃로 가정함)
⑩ 농도 계산 높이: 1.5m[3)]
⑪ 도시 및 시골 옵션: 시골(rural)옵션 선택

3) 모델 실행 결과

스크리닝 모델링에서는 통상 1시간 평균농도를 계산한다. 하루평균이나 연평균 농도가 필요할 때는 1시간 평균농도에 환산계수를 곱하여 산정할 수 있는데, 이는 다른 방법이 없을 때에 한해서 허용될 수 있다. 환산계수를 사용해서 다른 평균화시간에 대한 농도를 계산하는 예로 표 4는 미국에서 사용하고 있는 환산계수를 나타낸 것이다(US EPA, 1992)[4)].

본 연구에서는 K-SCREEN 모델을 통해 계산된 1시간 평균농도에 환산계수를 적용한 연평균농도를 이용하여 위해성 평가를 실시하였다. 그 결과, 아연이 5개 지역 모두에서 가장 높은 농도를 보였고, 대상지역 중 가장 고농도를 보인 지역은 사업지구와 560m 이격된 'B지역'인 것으로 나타났다. 'B지역'에서의 농도는 아연, 수은, 구리, 크롬 순으로 높게 나타났으며, 이때의 농도는 각각 4.33E-04, 3.37E-04, 2.35E-04, 1.68E-04$\mu g/m^3$이었다.

표 4. 평균화시간에 따른 농도 환산계수

평균화시간	환산계수
3시간	0.9 (±0.1)
8시간	0.7 (±0.2)
24시간	0.4 (±0.2)
1년	0.08 (±0.02)

현재 국내 소각시설에서 배출되는 중금속에 대한 기준으로 「대기환경보전법」에 "대기오염물질의 배출허용기준"이 있으며, 본 연구에서 논의되고 있는 8가지 중금속 물질 모두에 대해 배출허용기준을 설정해 두고 있다. 반면에, 「환경정책기본법」에서 제시하고 있는 "대기환경기준"에는 8가지 중금속 물질 중 납(Pb)에 대해서만 연평균기준치 0.5$\mu g/m^3$ 이하로 환경기준을 설정해 두고 있으며, 나머지 물질들에 대한 환경기준은 없는 실정이다.

납의 경우 사업지구 인근인 경상북도 ○○시 소재 중금속 측정망에서 측정된 2006년도 연평균 납 농도인 0.0455$\mu g/m^3$(환경부, 2007b)를 배경농도로 하여 본 소각장에서 배출되는 연평균 농도를 가중시킨 결과 대기환경기준인 연평균 0.5$\mu g/m^3$보다 크게 낮은 것으로 나타났다.

3) 어린이와 성인의 중간키로 가정하였으며 농도계산높이가 1~2m 범위 내에서는 농도의 차이가 거의 없음
4) 환산계수 옆 괄호 속의 값은 적용 가능한 환산계수의 변동폭을 나타냄. 타당한 근거가 있을 때를 제외하고는 환산계수가 표시한 변동폭을 벗어나서는 안되며 이러한 환산계수를 적용하여 시간평균값을 변환하는 것은 항상 세심한 주의를 필요로 함. 환산계수의 사용에는 어느 정도의 합리적인 근거가 있는 것은 사실이지만, 이를 사용하는 주된 이유는 편의 때문이며 실제현상은 매우 가변적이기 때문임(KEI, 1998).

표 5. K-SCREEN 모델 실행 결과(평균화시간: 1년, 환산계수 0.08 고려)

지 점 명	이격거리(m)	As($\mu g/m^3$)	Cd($\mu g/m^3$)	Cr($\mu g/m^3$)	Cu($\mu g/m^3$)
① A지역	1,075	1.115E-04	6.693E-05	1.499E-04	2.103E-04
② B지역	560	1.247E-04	7.483E-05	1.676E-04	2.351E-04
③ C지역	1,235	1.038E-04	6.231E-05	1.395E-04	1.958E-04
④ D지역	1,040	1.134E-04	6.808E-05	1.525E-04	2.139E-04
⑤ E지역	1,085	1.110E-04	6.658E-05	1.491E-04	2.092E-04
최고농도 발현지점	359	1.406E-04	8.440E-05	1.890E-04	2.651E-04
지 점 명	이격거리(m)	Hg($\mu g/m^3$)	Ni($\mu g/m^3$)	Pb($\mu g/m^3$)	Zn($\mu g/m^3$)
① A지역	1,075	3.018E-04	6.914E-05	6.714E-05	3.874E-04
② B지역	560	3.374E-04	7.730E-05	7.506E-05	4.331E-04
③ C지역	1,235	2.809E-04	6.437E-05	6.251E-05	3.606E-04
④ D지역	1,040	3.069E-04	7.033E-05	6.830E-05	3.940E-04
⑤ E지역	1,085	3.002E-04	6.878E-05	6.679E-05	3.854E-04
최고농도 발현지점	359	3.804E-04	8.720E-05	8.464E-05	4.883E-04

3. 위해성평가

비발암성 물질의 위해도를 계산하기 위해서 위해도지수(Hazard Coeffcient)를 이용할 수 있는데 대상지역의 물질별 위해도지수는 대기확산모델로 계산한 예측농도를 호흡노출참고치[5](Reference Concentration; RfC)로 나누어 계산할 수 있다. 비발암성 물질의 위해도지수는 그 값이 1을 초과하는 경우에는 유해 영향(독성)이 발생할 가능성을, 1 이하인 경우에는 안전역에 속해 있음을 의미한다. 위해도지수 계산식은 아래와 같다.

$$HQ(Hazard\ quotient) = \frac{\text{현황농도}(\mu g/m^3)}{\text{호흡참고치}(\mu g/m^3)}$$

발암성 물질의 위해도는 호흡단위위해도[6](inhalation unit risk)에 대기확산모델에 의해 예측된 예측농도를 곱하여 발암위해도를 계산할 수 있다. 발암위해도 계산식은 다음과 같다.

$$\text{발암위해도} = \text{호흡단위위해도}(\mu g/m^3)^{-1} \times \text{현황농도}(\mu g/m^3)$$

이와 같은 방법은 발암성 물질의 종류에 상관없이 위해성 평가에 활용할 수 있다. 현재 발암 물질에 대한 권고기준은 US EPA에서는 백만명당 1명(1×10^{-6})의 초과발암위해도가 발생되는 수준으로 정하고 있다. 또한 EPA에서는 대다수의 시민을 보호하기 위한 개인의 평생 발암 위해도는 오염원 인근의 거주자의 경우 70년 동안 최대오염농도에 노출되더라도 만명당 1명(10^{-4})을 초과하지 않도록 하고 있다(국립환경과학원, 2006). 반면에 세계보건기구에서는 십만명당 1명(1×10^{-5})의 초과발암위해도가 발생되는 수준으로 결정하고 있고 캐나다의 경우도 세계보건기구와 마찬가지로 십만명당 1명(1×10^{-5})의 초과발암위해도를 기준으로 하고 있다.

현재 미국 EPA에서는 발암성 여부를 판별하기 위해 아래 표와 같이 A, B1, B2, C, D, E의 6가지 기준을 제시하고 있으며, 일반적으로 이들 중에서 A, B1, B2에 속하는 물질들을 발암물질로 규정하고 있다.

소각로에서 배출되는 중금속류의 오염물질 중 EPA 기준에 따라 발암성으로 판별할 수 있는 물질은 비소, 카드뮴, 크롬, 니켈, 납이 해당되고, 나머지 물질들은 모두 부정확하거나 근거자료가 없어 인체 발암성으로 분류할 수 없는 상태인 D 그룹이다.

5) 호흡노출참고치(Inhalation RfC)는 일반적인 인구집단이 평생 동안 같은 농도로 매일 흡입하였을 때, 해(deleterious effect)를 일으키지 않는 수준의 농도 예상치를 의미하며, 일반적으로 비발암성 물질과 휘발성물질의 위해성 평가에 적용함.

6) 호흡단위위해도(Inhalation Unit Risk)는 일반적인 인구집단이 평생 동안 노출되었을 때, 증가되는 발암위해도의 위해도값의 95퍼센타일 값으로서, $\mu g/m^3$ 또는 $\mu g/l$ 당 위해도로 표현함.

표 6. 발암성 여부를 판별하기 위한 EPA 기준

Category	Criteria
A	Human Carcinogen (sufficient evidence of carcinogenicity in humans)
B1	Probable human carcinogen (limited evidence of carcinogenicity in humans)
B2	Probable human carcinogen (sufficient evidence of carcinogenicity in animals with inadequate or lack of evidence in humans)
C	Possible human carcinogen (limited evidence of carcinogenicity in animals with inadequate or lack of human data)
D	Not classifiable as to human carcinogenicity (inadequate or no evidence)
E	Evidence of noncarcinogenicity for humans (no evidence of carcinogenicity in adequate studies)

본 연구에서는 위해도 산정을 위하여 미국 EPA의 IRIS[7]에서 제시하고 있는 호흡단위위해도와 호흡노출참고치를 차용하여 발암위해도와 위해도지수를 계산하였다. 대상이 되는 8가지 물질 중 호흡단위위해도를 제시하고 있는 물질은 비소, 카드뮴, 크롬, 니켈이었으며, 호흡노출참고치를 제시하고 있는 물질은 크롬과 수은이었다. 구리, 납, 아연의 경우는 호흡단위위해도는 물론 호흡노출참고치가 제시되지 않아 전혀 분석이 이루어지지 못했다.

아래 표 7에 제시된 바와 같이, 대상지역 중 노출농도가 가장 높았던 'B 지역' 의 경우, 발암성 물질인 비소, 카드뮴, 니켈 각각의 발암위해도는 모두 EPA의 발암물질에 대한 권고기준인 1.00E-06보다 낮게 나타났으나, 크롬의 경우는 2.01E-06으로 EPA의 발암성 권고기준을 초과하는 것으로 나타났다. 다만, 위해도 분석 결과는 앞서도 언급한 바와 같이 주변지역으로의 확산농도 계산시 최악 조건을 가정하여 보수적인 농도를 계산해 주는 K-SCREEN 모델을 활용하였고, 일 소각용량이 36톤인 소각로에서 하루 24시간, 일년 내내 가동한다는 것을 가정하여 계산한 결과이기 때문에 그 수치는 다소 과대평가되었을 개연성이 있다.

또한, 대상물질 중 EPA에서 호흡노출참고치를 제시하고 있는 물질은 크롬과 수은 뿐이었다. 두 물질에 대한 위해도지수를 계산해 본 결과, 모두 EPA

7) 호흡노출참고치(RfC) 및 호흡단위위해도 자료: US Environmental Protection Agency(US EPA), Integrated Risk Information System(IRIS) on Substances, http://cfpub.epa.gov/ncea/iris

표 7. 위해도평가 결과

오염물질	발 암 성	노출농도[b] ($\mu g/m^3$)	호흡단위위해도[c] $(\mu g/m^3)^{-1}$	호흡노출참고치[c] ($\mu g/m^3$)	발암위해도[d]	위해도지수[e]
As	A	1.25E-04	4.30E-03	NA	5.36E-07	NA
Cd	B1	7.48E-05	1.80E-03	NA	1.35E-07	NA
Cra	A	1.68E-04	1.20E-02	8.00E-03	2.01E-06	2.10E-02
Cu	D	2.35E-04	NA	NA	NA	NA
Hg	D	3.37E-04	NA	3.00E-01	NA	1.12E-03
Ni	A	7.73E-05	2.40E-04	NA	1.86E-08	NA
Pb	B2	7.51E-05	NA	NA	NA	NA
Zn	D	4.33E-04	NA	NA	NA	NA
위해도 기준					1.00E-06	1.00E+00

[a] : 크롬의 경우는 보수적인 평가를 위해 모든 크롬물질(3가, 6가)을 6가 크롬으로 가정하였음
[b] : 노출농도는 K-SCREEN 모델 실행결과 중 농도가 최대가 되는 "B 지역"을 대상으로 하였음
[c] : 미국 EPA의 IRIS 자료를 활용하였음
[d] : 호흡단위위해도에 노출농도를 곱하여 계산함
[e] : 노출농도를 호흡노출참고치로 나누어 계산함
NA: Not Available

의 권고기준인 1보다 상당히 낮게 나타났다. 이는 대상지역에서 비발암물질의 호흡노출로 인한 위해도는 그다지 유의할 수준이 아닌 안전한 수준임을 나타낸다.

IV. 결론 및 논의

본 연구에서는 일 평균 소각용량이 36톤(1.5톤/hr)인 중규모 스토커식 소각로 1기를 설치하고, NOx 저감시설로 무촉매탈질설비(SNCR)와 산성가스 제거시설로 반건식반응기(SDR), 분진 및 중금속 제거시설로 여과집진시설(백필터)을 설치 예정인 "ㅇㅇ시 자원회수시설 민간투자시설사업"을 대상으로 중금속의 호흡노출로 인한 인체 위해성 평가를 실시하였다. 위해성 평가 대상지역은 사업지구 인근 1,500m 이내에 위치하고 있는 주거지역 5개 지점을 대상으로 하였다.

다양한 비발암물질과 발암물질에 대한 위해성 평가 결과 대부분의 물질들에 대한 위해도지수 및 발암위해도는 미국 EPA 기준을 충족하고 있는 것으로 나타났다. 그러나 크롬의 경우는 발암위해도가 EPA 기준보다 다소 높게 나타났다. 발암위해도는 크롬〉비소〉니켈〉카드뮴 순으로 높았으며, 이러한 결과는 대상 소각로에서의 발암물질에 대한 저감대책 수립 시 우선순위를 결정하는 데 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

다만, 본 연구에서 제시한 결과는 몇 가지 한계점이 있다. 첫째는 위해성 평가시 활용한 호흡단위위해도 및 호흡노출참고치 등에 대해 활용 가능한 국내 자료가 없다는 점이다. 따라서 본 연구에서는 미국 EPA 자료를 활용하였으나, 동 자료가 국내 실정과는 다를 수 있어 계산 결과에 오차를 가져올 수 있다. 둘째는 보수적인 계산을 위하여 대기확산모델 중 K-SCREEN 모델을 활용하여 결과를 예측하는 것도 의미가 있으나 보다 정확한 결과를 예측하기 위해 미국 EPA의 추천모델인 AERMOD, CALPUFF 등을 활용한다면 좀 더 신뢰성 있는 예측값을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서 수행한 소각로에서 배출되는 중금속의 호흡노출로 인한 인체 위해성 평가 기법은 향후 소각로 설치사업에 대한 건강영향평가 시행 시 의사결정자들과 일반대중의 합리적 의사결정에 도움이 될 수 있을 것으로 사료된다. 또한, 위에 제시한 연구의 한계점들은 관련 연구자들의 체계적인 연구를 통해 극복할 필요가 있으며, 이러한 한계점들이 개선된다면 좀 더 신뢰성 있는 결과를 산출할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구를 지원해주신 환경부와 한국환경정책 · 평가연구원에 감사드립니다.

참고문헌

국립환경과학원, 2006, 대기환경기준 개선(안) 공청회 자료집.

이진수, 전효택, 2005, 오염된 토양, 지하수 및 쌀의 인체노출에 따른 비소의 위해성 평가, 자원환경지질, 38(5), 535-545.

한국환경정책 · 평가연구원(KEI), 1998, 사업특성별 환경영향평가를 위한 모델의 비교연구.

환경부 · 국립환경과학원, 2004, 산업공정과 대기오염물질 배출계수(III).

환경부, 2007a, 건강영향평가 기법개발 및 시범사업 연구.

환경부, 2007b, 대기환경연보(2006).

쓰레기문제 해결을 위한 시민운동협의회, 2002, 소각과 건강-폐기물 소각장이 건강에 미치는 영향에 대한 지식의 현황-.

NRC(National Research Council), 1983, *Risk assessment in the Federal Government: Managing the process*, National Academy Press, Washington.

Pearl Moy, 2005, *A Health Risk Comparison of Landfill Disposal and Waste-to-Energy*

(WTE) Treatment of Municipal Solid Wastes in New York City(NYC), M.S. thesis, Columbia University.

US Environmental Protection Agency (US EPA), 1992, *Screening Procedures for Estimating the Air Quality Impact of Stationary Source (Revised).*

US Environmental Protection Agency (US EPA), Integrated Risk Information System (IRIS) on Substances, http://cfpub.epa. gov/ncea/iris

최종원고채택 09. 02. 02