

연구논문

신도시 내 소각로 운영에 대한 건강영향평가 사례 연구

- 중금속 흡입에 따른 인체 위해도 평가 -

명노일* · 이영수** · 신대윤***

조선대학교 대학원 환경생명공학과*, 한국환경정책·평가연구원 환경평가검토센터**, 조선대학교 환경공학과***

(2010년 4월 6일 접수, 2010년 6월 11일 승인)

A Case Study on Health Impact Assessment from Incinerator Operation in New Towns

- Human Risk Assessment due to Heavy Metals Inhalation -

Nho Il Myung* · Young soo Lee** · Dae Yewn Shin***

Department of Environment and Biological Engineering, Chosun University*

Korea Environment Institute**

Department of Environmental Engineering, Chosun University***

(Manuscript received 6 April 2010; accepted 11 June 2010)

Abstract

We conducted a quantitative human health risk assessment with respect to inhalation of heavy metals for residents of housing developments in "new towns" where an incinerator will be operated within the area scheduled for construction thereof. To assess potential human health risk we calculated the amount of heavy metals emitted from the incinerator, and then forecasted the potential health impact on adjoining areas where new housing is to be developed (i.e. "new towns") at different altitudes by using SCREEN-3 model. We assessed Cancer Risk (CR) caused by known carcinogens using the Inhalation Unit Risk criteria developed by the US Environmental Protection Agency. Notably, we assessed risk by determining concentrations of heavy metals on a floor by floor basis, as apartment buildings are to be constructed near the incinerator according to a pre-devised plan. Results indicated that cancer risk for most carcinogens exceeded US EPA standards for the highest locations at each collection point. This result indicates that construction of high buildings in areas adjoining incinerators is undesirable, and that measures to lower carcinogens are needed. The results of this study, which assessed health risk from exposure to heavy metals emitted from a nearby incinerator, can be useful in land use planning with respect to the location of housing developments in new towns, as well as the heights of any buildings constructed. Furthermore, the methodology

deployed herein with respect to risk assessment can be helpful for policy makers and the general public in the event of conflicts regarding incinerator projects in the future. The results herein may also be of merit in determining priorities when establishing harm reduction measures for carcinogens at incinerators. However, the study does contain several limitations. The SCREEN-3 model, a kind of screening model that provides conservative results, can provide higher forecasted concentrations of air pollutants than other models. Moreover, although the incinerator in question is set to be a thermoselect type, domestic data for emissions from these incinerators is not available, and assumptions were based on a stoker type incinerator. Insufficient domestic data likewise compelled the use of data of USA, resulting in possible errors in results. Continued research will thus be required to develop systematic methodologies that address the foregoing factors and produce more reliable outcomes.

Keywords : Health Impact Assessment, Incinerator, Heavy Metals, Inhalation Exposure, Risk Assessment, Land Use Planning

1. 서론

우리나라의 과거 환경정책은 더러워진 공기, 물, 토양 등을 깨끗하게 치유하는 데 중점을 두어 오염 매체별로 수립되어 왔으나 2006년부터 사람 건강을 중심으로 사전예방적 차원에서 정책을 수립하도록 환경정책의 패러다임을 전환하였다. 특히 2008년 3월에는 환경영향평가대상사업의 일부사업에 대하여 환경영향평가 협의 시 인체에 미치는 영향을 추가하여 검토하도록 하는 건강영향평가를 수행하도록 「환경보건법」을 제정하였다.

동 법 제13조(건강영향 항목의 추가·평가 등) 제1항은 “사전환경성검토 또는 환경영향평가의 대상이 되는 행정계획 및 개발사업 중 대통령령으로 정하는 행정계획 및 개발사업에 대하여는 환경유해인자가 국민건강에 미치는 영향을 추가하여 평가”하도록 규정하고 있다. 특히 평가방법론에 있어서는 기존의 환경영향평가 틀 내에서 건강영향을 추가로 평가하는 것이 우리나라 실정에 맞는 것으로 판단하여 현행 평가항목 중 위생·공중보건 항목에서 건강영향을 평가하도록 방향을 설정하였다(환경부, 2007). 또한 건강영향 추가·평가의 대상으로 환경영향평가대상사업 중에서 산업단지 조성, 화력발전소 건설, 소각로·매립장·축산폐수공공처리시설 등을 선정하고 2010년부터 시행하도록 규정하였다. 건강영향평가는 정책, 계획, 프로그램, 프로젝트

등이 인체 건강에 미치는 영향을 사전에 평가하여 의사결정권자의 의사결정에 도움을 주기 위한 제도로서 세계보건기구(WHO)나 영국, 캐나다, 호주, 미국, EU 등에서 활용하고 있다. 이들 나라나 세계기구에서는 개별 법, 정책, 계획, 프로그램, 프로젝트 등을 건강영향평가 대상으로 삼고 평가를 진행하고 있는 실정이다(환경부, 2007).

현재 우리나라에서는 보금자리 주택을 비롯하여 대규모의 택지개발이 진행되고 있는 실정이며 개발면적이 30만²m 이상인 택지의 경우 「폐기물처리시설 설치 촉진 및 주변지역 지원 등에 관한 법률」에 의거하여 소각로 등과 같은 폐기물 처리시설을 택지 내에 계획하고 있다.

소각로는 건강영향평가 대상사업 중의 하나로서 다이옥신 및 중금속 등을 대기 중으로 배출하기 때문에 인체 건강에 미치는 영향이 크다고 할 수 있다. 특히, 소각로 연돌에서 배출되는 연기 내에는 잘 분해되지 않고 건강에 큰 영향을 미칠 수 있는 납, 카드뮴, 수은 등의 중금속이 포함되어 있다¹⁾. 수은은 혈압 상승, 고혈압 등 심혈관 질환이나 기형과 같은 발육장애, 신경장애, 암 등을 유발하는 것으로

1) 전 세계적으로 소각은 대기로 배출되는 중금속의 주원인이 되고 있음. 1990년 유럽연합 내에서 소각으로 인한 카드뮴의 배출량은 8%, 수은은 16% 정도를 차지하는 것으로 추정된 바 있음(쓰레기 문제 해결을 위한 시민운동연합회, 2002).

보고되고 있고, 카드뮴은 흡입을 통해 암을 유발하거나 폐 기능을 손상시킬 수 있으며, 고농도에 노출시 빈혈이나 위에 자극을 줄 수 있다고 보고되고 있다(Pearl Moy, 2005). 한편, 외국의 건강영향평가 사례 중 소각로에서 배출되는 중금속 등이 주변지역 주민들에 인체에 미치는 영향을 사전에 평가한 사례는 현재까지는 확인되지 않았다. 우리나라의 경우는 (주)금호환경, 서울시 자원회수 시설 등 기존 소각로 운영 시 대기오염으로 인한 주민건강 조사·연구를 역학조사 형태로 진행된 사례(환경부, 2009a)나 기존 소각로 근로자와 주변 지역 주민들에 대한 다이옥신 평가를 실시한 경우(임중환, 2003)적은 있으나 환경평가와 관련하여 환경부가 정하고 있는 방법(환경부, 2009a)에 따라 사전에 소각로에서 배출되는 중금속이 주변 주거지역에 미치는 영향을 정량적으로 평가한 사례는 “○○시 자원회수시설 민간투자사업”을 대상으로 실시된 사례가 있다(이영수, 2009b).

현재 신도시 내 소각로가 계획된 도시개발사업의 환경영향평가에서는 건강에 미치는 영향을 고려하지 않고 소각로와 공동주택 등과 이격거리만 확보하는 것으로 토지이용계획을 결정하는 경우가 다수 있다. 이에 본 연구에서는 기 검증된 평가방법(이영수, 2009b)을 활용하여 신도시 내에 건설될 예정인 소각로에서 배출되는 중금속이 계획된 신도시 내 공동주택 등에 미치는 영향 정도를 아파트 높이별 인체위해도로 평가하였으며 평가결과를 바탕으로 토지이용계획의 적절성을 확인하고자 하였다.

II. 연구방법

1. 대상소각로 개요

연구의 대상은 “○○ 신도시개발사업 환경영향평가서에 제시된 소각로”로서 일 평균 소각용량이 50톤이다. 소각방식은 열분해용융식으로 계획하고 있다.

2. 연구 방법

소각로에서 배출되는 중금속의 호흡노출로 인한

인체위해도를 평가하기 위해, 첫째, 국립환경과학원(2004)에서 제시하고 있는 생활폐기물 스토커 소각로 연돌에서의 중금속 배출계수를 활용하여 발생량을 산정하였다. 신도시 내 소각로의 방식은 열분해용융방식이지만 이 방식의 소각로에서 배출되는 중금속의 발생량을 산정할 수 있는 배출계수가 현재 우리나라에는 마련되어 있지 않기 때문에 부득이하게 스토커 소각로의 배출계수를 활용하게 되었다. 두 번째로 최악 기상조건을 선정하여 농도를 보수적(Conservative)으로 계산하는 SCREEN 3 모델을 이용하여 소각 시 배출되는 중금속이 주변지역에 미치는 확산농도를 예측하였다. 마지막으로 위해도 평가를 수행하였는데 발암성 물질에 대해서는 호흡단위위해도(inhalation unit risk)에 대기 확산모델에 의해 예측된 예측농도를 곱하여 발암위해도(CR; Cancer Risk)를 계산하였다. 수은(Hg)의 경우는 발암 D급 물질이나 호흡단위위해도 자료가 없기 때문에 비발암성 물질로 가정하여 위해도지수(Exposure Quotient)를 계산하였다.

아래 그림 1은 연구흐름을 나타낸 것이다.

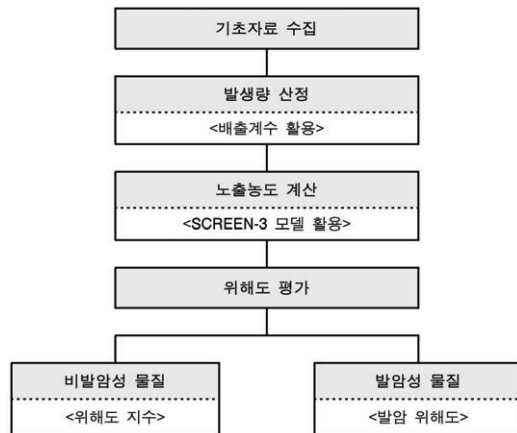


그림 1. 연구 흐름도

3. 중금속 발생량 산정

소각로에서 배출되는 중금속의 배출량 산정을 위해서 환경부에서 제시한 생활폐기물 소각로 연돌에서의 중금속 배출계수를 활용하였다(환경부, 2004). 생활폐기물 배출계수 외에 지정폐기물 소각로 연돌

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

에서의 오염물질 배출계수 등도 제시하고 있으며, 스토커, 로타리 킬른, 분무연소 등 소각 방식별로 배출계수를 각기 다르게 산정해 두고 있다. 금번 연구에서는 신도시 내의 소각로가 열분해용융방식으로 계획되어 있으나 이에 대한 배출계수가 없는 관계로 스토커 소각로의 배출계수를 이용하였다.

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

$$\text{배출량(kg/yr)} = \text{소각량(ton/yr)} \times \text{배출계수(kg/ton)}$$

본 연구에서는 소각량 산정 시 하루 24시간, 일년 내내 소각로를 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 활용하였다²⁾.

4. 중금속 농도 예측 모델

1) 영향예측 대상지역

사업 시행으로 인한 영향은 최대농도착지지점을 대상으로 예측하였다. 최대농도착지지점은 가장 높

은 농도가 나타나는 지점을 의미하며 수용점의 고도에 따라 그 지점 및 농도가 달라진다. 특히 금번 연구의 대상인 소각로는 신도시 내에 설치될 예정이며 신도시 내에는 35층 아파트도 계획되어 있어 수용점의 높이를 다양하게 변화(1층, 15층, 25층, 35층)시키면서 최대농도를 산출하였다.

2) 모델 입력조건

신도시 내 소각로 건설에 따른 중금속 오염물질의 주변지역으로의 영향을 예측하기 위해 대기확산 모델 중 대표적인 스크리닝 모델인 SCREEN 3 모델을 활용하였다. 동 모델은 미국환경보호청에서 추천하고 있는 예비검토모델(screening model)의 대표적인 모델로서 점 오염원, 면오염원, 부피 오염원으로 인한 영향 예측에 많이 활용되고 있다. 특히 기상자료를 필요로 하지 않으며 모델 내에 내장된 최악의 기상을 스스로 선정하기 때문에 현지에서의 기상측정이나 기상자료 수집을 위한 시간과 비용을 절감할 수 있고 배출조건과 간단한 지형조건만으로 보수적인 농도를 예측하기 때문에 다른 모델을 사용하여 예측한 농도보다 더 높은 값을 제공해 준다(한국환경정책·평가연구원, 1998).

SCREEN 3 모델을 실행하기 위해서는 여러 가지 입력조건들을 설정해 주어야 하는데 본 연구에서는 다음과 같은 모델 입력조건을 적용하였다.

- ① 배출원 형태: 점오염원
- ② 대상오염물질³⁾
 - 비소, 카드뮴, 크롬, 니켈, 납, 수은
- ③ 배출량: 환경부(2004)의 배출계수를 활용하여 산정

2) 일반적으로 소각로에서 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.

3) 배출계수에는 구리, 아연이 포함되어 있으나 이들 물질에 대한 위해도를 계산할 수 있는 호흡단위위해도가 없어 이들 물질은 평가에서 제외함. 납(Pb)의 경우도 호흡단위위해도가 없으나 연평균 국가환경기준(0.5 μ g/m³)이 있기 때문에 평가를 수행함.

표 2. 환산계수

평균화시간	환 산 계 수
3시간	0.9 (±0.1)
8시간	0.7 (±0.2)
24시간	0.4 (±0.2)
1년	0.08 (±0.02)

- ④ 농도 계산 지점: 최대착지지점의 농도
- ⑤ 굴뚝 높이: 80m
- ⑥ 굴뚝 내부 반경: 0.6m
- ⑦ 굴뚝가스 배출 속도: 19m/s
- ⑧ 배출가스 온도: 474.8K
- ⑨ 주변공기 온도: 290K(주변대기온도를 17℃로 가정함)
- ⑩ 농도 계산 높이: 1층(약 3m), 15층(약 45m), 25층(약 75m), 35층(약 105m)
- ⑪ 도시 및 시골 옵션: 도시(urban)

스크리닝 모델링에서는 통상 1시간 평균농도를 계산한다. 일평균이나 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 데 사용되는 표 3은 미국환경보호청에서 사용하고 있는 것이다(미국환경보호청, 1992)⁴⁾.

본 연구에서는 SCREEN 3 모델을 통해 계산된 1시간 평균농도에 환산계수를 적용한 일평균농도를 이용하여 위해도 분석을 실시하였다. 다만, 납의 경우는 국가환경기준이 연평균인 관계로 연평균농도로 계산하여 국가환경기준과 비교하였다.

5. 위해성 평가

비발암성 물질의 위해도를 계산하기 위해서 위해도 지수(Hazard Coefficient)를 이용할 수 있는데 이는 대기확산모델로 계산한 예측농도를 호흡노출참고치⁵⁾(RfC; Reference Concentration)로 나누어 계산할 수 있다⁶⁾. 비발암성 물질의 위해도 지수는 그 값이 1을 초과하는 경우에는 유해 영향(독성)이 발생할 가능성을, 1 이하인 경우에는 안전역에 속해 있음을 의미한다. 위해도 지수 계산식은 아래

와 같다.

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

발암성 물질의 위해도는 호흡단위위해도⁷⁾(inhalation unit risk)에 대기확산모델에 의해 예측된 예측농도를 곱하여 발암위해도(CR; Cancer Risk)를 계산할 수 있다. 발암위해도 계산식은 다음과 같다.

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

이와 같은 방법은 발암성 물질의 종류에 상관없이 위해도 평가에 활용할 수 있다.

표 3. 발암성 여부를 판별하기 위한 미국환경보호청 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)

- 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(한국환경정책·평가연구원, 1998).
- 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 위해도 평가에 적용함.
- 6) 원칙적으로는 현황농도에 가중농도를 합산한 농도를 사용하여야 하나 고층에서의 중금속 농도는 현재 측정이 곤란하기 때문에 가중농도만을 활용함.
- 7) 호흡단위위해도(Inhalation Unit Risk)는 사람들이 대기 중에서 1μg/m³의 농도로 존재하고 있는 오염물질을 평생 동안 흡입했을 때, 발암 가능성의 상한값.

현재 미국 미국환경보호청에서는 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 미국환경보호청 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 그룹이었다.

본 연구에서는 위해도 산정을 위하여 미국 미국환경보호청의 IRIS⁸⁾에서 제시하고 있는 호흡단위위해도와 호흡노출참고치를 차용하여 발암 위해도와 위해도 지수를 계산하였다. 대상이 되는 물질 중 호흡단위위해도를 제시하고 있는 물질은 비소, 카드뮴, 크롬, 니켈이었으며, 호흡노출참고치를 제시하고 있는 물질은 크롬과 수은이었다. 구리, 아연의 경우는 호흡단위위해도는 물론 호흡노출참고치가 제시되지 않아 분석을 할 수 없었다.

III. 연구결과

1. 중금속 배출량 산정

소각로에서 배출되는 중금속의 양을 산정한 결과, 아연, 수은, 구리, 크롬 순으로 배출량이 많았으며, 이때 아연의 배출량은 0.12E+02(kg/yr)이었다. 보다 구체적인 배출량 산정결과는 표 4와 같다.

표 4. 소각로 배출량 산정 결과

오염물질	방 지 시 설	배출계수[kg/ton]	소각량(ton/yr)	배출량(kg/yr)	배출량(g/s)
As	전기집진시설/흡수시설	2.623E-04	18,265	0.48E+01	0.152E-03
Cd	흡수시설/여과집진시설	1.574E-04	18,265	0.288E+01	0.912E-04
Cr	흡수시설/여과집진시설	3.525E-04	18,265	0.644E+01	0.204E-03
Cu	전기집진시설/흡수시설	4.946E-04	18,265	0.904E+01	0.286E-03
Hg	전기집진시설/흡수시설	7.096E-04	18,265	1.296E+01	0.415E-03
Ni	흡수시설/여과집진시설	1.626E-04	18,265	0.298E+01	0.942E-04
Pb	흡수시설/여과집진시설	1.579E-04	18,265	0.288E+01	0.915E-04
Zn	흡수시설/여과집진시설	9.110E-04	18,265	0.167E+02	0.528E-03

2. 중금속 농도

표 5는 수용점 높이별로 최대착지지점에서의 중금속 농도를 나타낸 것이다. 수용점의 높이가 가장 높은 35층에서 모든 중금속의 농도가 높게 나타났으며 수용점의 높이가 낮을수록 농도가 낮게 나타났다. 이는 대규모 점오염원에서 배출되는 연기의 이동 양상을 고려할 때, 일반적으로 나타나는 현상과 동일한 것으로 해석할 수 있다.

표 5. 수용점 높이별 최대착지지점의 거리 및 농도(평균화 시간: 24시간, 환산계수 0.4 고려)

높이	최대착지 지점거리(m)	As ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Cd ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Cr ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
1층	490	4.85E-04	2.91E-04	6.5E-04
15층	371	5.72E-04	3.432E-04	7.67E-04
25층	100	2.84E-03	1.704E-03	3.8E-03
35층	100	2.13E-02	1.28E-02	2.85E-02
지점명	최대착지 지점거리(m)	Hg ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Ni ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Pb ⁹⁾ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
1층	490	1.32E-03	3.0E-04	5.82E-05
15층	371	1.56E-03	3.55E-04	6.86E-05
25층	100	7.75E-03	1.76E-03	3.4E-04
35층	100	5.82E-02	1.32E-02	2.56E-03

8) 호흡노출참고치(RfC) 및 호흡단위위해도 자료: US Environmental Protection Agency, Integrated Risk Information System(IRIS) on Substances, <http://cfpub.usepa.gov/ncea/iris>

9) 납의 경우는 국가환경기준과 비교하기 위하여 연평균 농도로 계산함.

3. 위해성 평가

앞서 표 5에 나타난 바와 같이 35층에서 중금속의 농도가 가장 높았기 때문에 그 농도를 활용하여 위해성 평가를 수행하였으며 그 결과를 표 6에 정리하였다. 비소, 카드뮴, 크롬, 니켈 등 대부분의 중금속의 위해도는 10^{-6} 을 초과하는 것으로 예측되었다. 우리나라의 경우는 10^{-6} 기준을 원칙으로 하되 사업자가 강구할 수 있는 모든 대책을 다 수립한 이후에는 10^{-5} 을 적용할 수 있도록 “건강영향 항목의 검토 및 평가에 관한 업무처리 지침(환경부 예규 제 400호)”에 규정하고 있다. 따라서 발암위해도를 낮출 수 있도록 대책을 수립하여야 한다고 판단할 수 있다. 대표적인 대책으로서의 대기오염저감시설의 추가 설치, 소각로 연돌과 고층아파트의 이격거리 확보, 이격거리를 확보하기 어려운 경우 아파트의 층수를 하향 조정 등을 생각할 수 있다.

한편 납의 경우는 건강영향을 판단하는 데 필요한 호흡노출참고치, 호흡단위위해도와 같은 자료가 없기 때문에 국가환경기준과의 비교만으로 위해성 여부를 판단하였다. 사업지구가 속한 서울시의 2008년도 평균농도인 $0.0453 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (환경부, 2009b)를 배경농도로 하여 본 소각로에서 배출되는 연평균 농도를 가중시킨 결과 대기환경기준인 연평균 $0.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 크게 하회하는 것으로 나타났다.

한편 미국환경보호청에서는 발암 물질에 대한 권

고기준으로 100만 명당 1명(1×10^{-6})의 초과발암위해도가 발생하는 수준으로 정하고 있다. 또한 미국 환경보호청에서는 대다수의 시민을 보호하기 위한 개인의 평생 발암 위해도는 오염원 인근의 거주자의 경우 70년 동안 최대오염농도에 노출되더라도 1만 명당 1명(10^{-4})을 초과하지 않도록 하고 있다(국립환경과학원, 2006). 반면에 세계보건기구(WHO)에서는 10만 명당 1명(1×10^{-5})의 초과발암위해도가 발생하는 수준으로 결정하고 있고 캐나다의 경우도 세계보건기구와 마찬가지로 십만 명당 1명(1×10^{-5})의 발암위해도를 기준으로 하고 있어 나라별로 기준 적용에 차이가 있는 실정이다.

그러나 이 결과는 앞서도 언급한 바와 같이 주변 지역으로의 확산농도 계산 시 최악 조건을 가정하여 보수적인 농도를 계산해 주는 모델을 활용하였고, 일 소각용량이 50톤인 소각로가 하루 24시간, 일년 내내 가동한다는 것을 가정하여 계산한 결과이기 때문에 그 수치는 다소 과대평가되었을 가능성은 있다. 따라서 보다 정확한 예측을 위해서는 당해 사업 부지에서의 부지기상 자료를 바탕으로 보다 정교한 모델인 CALPUFF 등을 이용하고 실제 운영조건을 반영하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

또한, 금번 위해성 평가 대상물질 중 미국환경보호청에서 호흡노출참고치를 함께 제공하고 있는 물

10) 농도를 국가환경기준과 비교한 결과임.

표 6. 35층 높이에서의 위해도 평가 결과

오염물질	발암성	노출농도 ^b ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	호흡단위위해도 ^c ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ⁻¹	호흡노출참고치 ^c ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	발암위해도 ^d	위해도지수 ^e
As	A	2.13E-02	4.30E-03	-	9.16E-05	-
Cd	B1	1.28E-02	1.80E-03	-	2.34E-05	-
Cr ^a	A	2.85E-02	1.20E-02	8.00E-03	3.42E-04	3.56
Hg	D	5.82E-02	-	3.00E-01	-	0.194
Ni	A	1.32E-02	2.40E-04	-	3.17E-06	-
Pb	B2	2.56E-03	-	-	-	0.004 ¹⁰⁾
위해도 기준					1.00E-06	1.00

a : 크롬의 경우는 보수적인 평가를 위해 모든 크롬물질(3가, 6가)을 6가 크롬으로 가정하였음.

b : 노출농도는 SCREEN 모델 실행결과 중 농도가 최대가 되는 “B 지역”을 대상으로 하였음.

c : 미국 미국환경보호청의 IRIS 자료를 활용하였음.

d : 호흡단위위해도에 노출농도를 곱하여 계산함.

e : 노출농도를 호흡노출참고치로 나누어 계산함.

질은 크롬과 수은인데 크롬은 강력한 발암물질이므로 호흡단위위해도를 이용하여 발암위해도를 계산하는 것이 더 타당하다고 볼 수 있다. 반면에 수은은 D급 물질이며 호흡단위위해도가 없기 때문에 호흡노출참고치를 이용하였다. 수은에 대한 위해도 지수를 계산해 본 결과, 환경부에서 정하고 있는 기준인 1.0보다 5배 정도 낮게 나타났다. 이는 대상지역에서 수은의 호흡노출로 인한 위해도는 안전한 수준인 것으로 해석할 수 있다.

IV. 결론 및 논의

신도시 내 소각로에서 배출되는 발암물질과 비발암물질에 대한 위해도 평가 결과 대부분의 발암물질들에 대한 발암위해도는 환경부에서 정하고 있는 기준을 초과하는 것으로 나타났다. 발암위해도는 크롬 > 비소 > 카드뮴 > 니켈 순으로 높았으며, 이러한 결과는 대상 소각로에서의 발암물질에 대한 저감대책 수립 시 우선순위를 결정하는 데 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

적용가능한 대표적인 저감대책으로는 첫째, 중금속을 제거할 수 있는 저감시설을 충분하게 설치하고, 둘째, 소각로와 고층아파트의 이격거리를 확보하거나 아파트의 층수를 하향 조정하도록 토지이용계획을 수립하는 것이다.

다만, 본 연구에서 제시한 결과는 몇 가지 한계점이 있다. 첫째는 보수적인 계산을 위하여 대기확산 모델 중 SCREEN 3 모델을 활용하여 결과를 예측했기 때문에 농도가 과다예측될 수 있다. 따라서 보다 정확한 결과를 예측하기 위해 미국 미국환경보호청의 추천모델인 CALPUFF 등을 활용하여 신뢰성 있는 예측값을 얻는 것이 더 바람직하다. 둘째는 위해도 평가 시 활용한 호흡단위위해도 및 호흡노출참고치 등에 대해 활용 가능한 국내 자료가 없다는 점이다. 본 연구에서는 미국 미국환경보호청 자료를 활용하였으나, 동 자료가 국내 실정과는 다를 수 있어 계산 결과에 오차를 가져올 수 있다. 이점에 대해서는 국가차원에서 지속적으로 자료를 조사

하고 축적하여야 할 것으로 생각된다.

본 연구에서 수행한 소각로에서 배출되는 중금속의 호흡노출로 인한 위해도평가 기법은 향후 신도시 내 소각로 설치사업에 대한 분쟁 발생 시 의사결정자들과 일반대중의 합리적 의사결정에 도움이 될 수 있을 것으로 사료된다. 아울러 신도시 건설 시 건강영향평가 결과를 활용한다면 보다 쾌적한 환경을 누릴 수 있는 합리적인 토지이용계획을 수립하는데 도움이 될 수 있을 것으로 생각된다.

사 사

본 논문은 한국환경정책·평가연구원 수탁과제인 “건강영향평가 기법개발 및 시범사업 연구(II)”의 일부로서 본 연구를 지원해주신 환경부와 한국환경정책·평가연구원에 감사드립니다.

참고문헌

- 국립환경과학원, 2006, 대기환경기준 개선(안) 공청회 자료집, 국립환경과학원.
- 김영하, 최상기, 이영수, 2009, 소각로 건설사업에 대한 건강영향평가 사례 연구, 환경영향평가학회지, 18(1), 11-19.
- 쓰레기문제 해결을 위한 시민운동협의회, 2002, 소각과 건강-폐기물 소각로가 건강에 미치는 영향에 대한 지식의 현황.
- 임종한, 홍운철, 이관희, 권화장, 장재연, 2003, 국내 일부 소각장 근로자와 주변지역주민들의 PCDD/Fs 노출과 건강영향평가, 예방의학회지 36(4), 314-322.
- 환경부·국립환경과학원, 2004, 산업공정과 대기오염물질 배출계수(III), 환경부.
- 환경부, 2007, 건강영향평가 기법개발 및 시범사업 연구(I), 환경부.
- 환경부, 2008, 건강영향평가 기법개발 및 시범사업 연구(II), 환경부.
- 환경부, 2009a, 건강영향 항목의 검토 및 평가에 관

- 한 업무처리 지침(환경부예규 제400호), 환경부.
- 환경부, 2009b, 대기환경연보(2008), 환경부.
- 한국환경정책·평가연구원, 1998, 사업특성별 환경영향평가를 위한 모델의 비교연구, 한국환경정책·평가연구원.
- 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, 1992, Screening Procedures for Estimating the Air Quality Impact of Stationary Source (Revised).
- US Environmental Protection Agency, Integrated Risk Information System(IRIS) on Substances, <http://cfpub.usepa.gov/ncea/iris>

최종원고채택 10. 06. 14