

연구논문

석유정제시설 운영에 대한 건강영향평가 사례 연구

- 화학물질 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 Petroleum Refinery Plant Operation

- Human Risk Assessment due to Chemicals 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 human risk assessment for exposure to inhalation of chemical substances emitted from the storage tanks of petroleum refineries. To assess human risk, this study calculated chemical emissions from the external floating roofs on storage tank at petroleum refineries, as well as concentrations thereof in the ambient air using the K-SCREEN model, and then determined risk in accordance with the Reference Concentration (RfC) values and Inhalation Unit Risk criteria developed by the US Environmental Protection Agency. The results indicated that non-carcinogenic chemicals have a hazard quotient of less than 1, meaning they have an insignificant effect on human health for residential areas near the storage tanks. Among the known carcinogens, the hazard risk for benzene slightly exceeded 10^{-6} , indicating the need for corrective reduction measures.

The methodology for health impact assessment devised herein provides findings useful in decision making for policy makers and the general public with respect to construction of industrial complexes. However, the methodology proposed herein does have limitations, including discrepancy in results induced by use of U.S. data (due to the lack of usable domestic data). More systematic studies from related researchers will be needed to address these issues and produce more reliable outcomes.

Keywords : Health Impact Assessment, Petroleum Refineries, Chemical Substances, Inhalation Exposure, Risk Assessment

1. 서론

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

건강영향평가제도는 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 세계 기구에서는 개별 법, 정책, 계획, 프로그램, 프로젝트 등을 건강영향평가 대상으로 삼고 평가를 진행하고 있는 실정이다(환경부, 2007).

과거 우리나라의 환경정책은 더러워진 공기, 물, 토양 등을 깨끗하게 치유하는 데 중점을 두고 오염 매체별로 수립되었다. 그러나 2006년부터 사람 건강을 중심으로 사전예방적 차원에서 정책을 수립하고 국민의 참여와 협력을 강화하는 방향으로 정책의 패러다임을 전환하였으며, 이의 일환으로 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 2010년

부터 시행되었다. 특히 평가방법론에 있어서는 기존의 환경영향평가 틀 내에서 건강영향을 추가로 평가하는 것이 우리나라 실정에 맞는 것으로 판단하여 현행 평가항목 중 위생·공중보건 항목에서 시설 운영 시를 중점으로 건강영향을 평가하도록 방향을 설정하였다. 또한, 건강영향평가 대상에는 산업단지 조성, 화력발전소 건설, 소각장·매립장·축산폐수공공처리시설 등이 포함된다(환경부, 2009).

이러한 사업들에 대한 건강영향평가가 효율적으로 이루어지기 위해서는 과학적인 평가방법을 미리 구축할 필요가 있다. 특히 지난 30여 년간의 환경영향평가의 국내 운용과정을 살펴볼 때, 우리나라에서는 정량적인 평가가 의사결정을 위한 매우 중요한 역할을 하였다. 따라서 건강영향평가에서도 정량적인 평가를 위한 기법은 매우 중요하다고 할 수 있다. 이를 위하여 환경부에서는 “건강영향 항목의 검토 및 평가에 관한 업무처리 지침(환경부 예규 제400호)”를 마련하여 건강영향 추가·평가 대상사업 별로 평가방법, 평가항목 등을 설정하였다.

금번 연구의 대상인 산업단지는 다양한 대기오염 물질 및 특정대기유해물질이 배출되기 때문에 타 사업에 비하여 인체 건강에 미치는 영향이 크다고 할 수 있다. 특히, 석유정제시설의 경우 저장탱크에서 배출되는 휘발성 유기화합물을 포함한 다양한 화학물질로 인한 사회적 논란이 있었던 경우도 있었다. 우리나라의 경우 일부 공단지역 내 이산화질소로 인한 건강위해성평가 사례(전용택, 2008), 군산지방산단·광양·여수산단 주변지역 주민건강역학조사(환경부, 2008) 등과 같은 기존 산업단지로 인한 건강영향을 평가한 다수의 사례는 있었다. 하지만 환경영향평가제도와 관련하여 사전에 석유정제시설로 인한 건강영향을 평가한 사례는 없는 실정이다. 다른 외국에서도 석유정제시설에서 발생하는 화학물질의 인체 호흡으로 인한 건강영향평가를 수행한 사례가 거의 없다.

이에 본 연구에서는 환경부 예규와 기 검증된 정량적 건강영향평가 기법(이영수, 2009)을 활용하여 석유정제시설 중 석유저장탱크에서 배출되는 화학물질의 호흡노출로 인한 인체 위해도 평가를 실시하여 주변 주거지역 주민들의 건강에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다. 아울러 건강영향평가를 실시함에 있어 현 단계에서의 한계점과 향후 활용 가능성에 대해서도 함께 살펴보았다.

II. 연구방법

1. 연구 방법

석유저장탱크에서 배출되는 화합물질의 호흡으로 인한 인체위해도를 평가하기 위해, 첫째, 미국환경보호청에서 활용하고 있는 TANK 프로그램을 이용하여 발생량을 산정하였다. 두 번째로 최악 기상조건을 자동적으로 선정하여 농도를 보수적(conservative)으로 제공하는 K-SCREEN 모델을 이용하여 탱크에서 배출되는 화학물질이 주변지역에 미치는 확산 농도를 예측하였다. 마지막으로 위해도 평가를 수행하였는데 발암성 물질에 대해서는 호흡단위위해도(inhalation unit risk)에 대기확산모델에 의해 예측된 예측농도를 곱하여 발암위해도(CR: Cancer Risk)를 계산하였고, 비발암성 물질에 대해서는 위해도 지수(Hazard Quotient)를 계산하였다.

연구 흐름도는 그림 1과 같다.

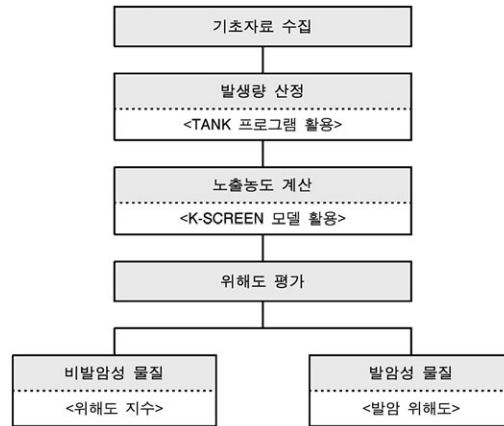


그림 1. 연구 흐름도

2. 대상사업 개요

평가대상인 저장탱크의 제원은 표 1과 같다.

저장탱크에 저장될 원유 내 화학물질의 종류 및 특성은 표 2와 같다.

표 1. 저장탱크의 제원

	내 용	비고
탱크명	○○(주) 원유저장탱크	
탱크 지름(m)	50	
최대 액위(m)	25	
연간총유출입량(m ³ /년)	500,000	
연간유입회수(회/년)	10.19	
Rimseal 종류	Mechanical Shoe	
Deck 종류	Pontoon	
저장물질	원유	
Ried 증기압(psi)	5	

표 2. 원유에 포함된 화학물질의 종류 및 특성

화학물질명	액상무게(%)	분압(mmHg)	액상물분률	증기물분률	분자량(g/mol)
n-헥산	0.4	0.8803	0.0096	0.0063	86.18
벤젠	0.6	0.8808	0.0159	0.0063	78.11
이소옥탄	0.1	0.0009	0.0018	0	114.22
톨루엔	1.0	0.3526	0.0225	0.0025	92.14
에틸벤젠	0.4	0.0384	0.0078	0.0003	106.17
m-자일렌	1.4	0.1172	0.0273	0.0008	106.17
이소프로필 벤젠	0.1	0.0038	0.0017	0	120.19
1,2,4-트리메틸벤젠	0.33	0.0058	0.0057	0	120.19
시클로hexan	0.7	1.0090	0.0172	0.0072	84.16

표 3. TANK 프로그램 세부 내용

구 분	세 부 사 항
실행프로그램 및 매뉴얼	• US EPA Web site(http://www.epa.gov/ttnchie1/software/tanks)
개 요	• 화학물질 저장탱크로부터 대기로의 배출량 산정 프로그램 • 저장탱크 종류별 배출량 산정 가능
입력자료	• 탱크의 종류 • 탱크 제원 - 탱크 높이, 용량, 지름 - 탱크벽 및 탱크 지붕의 크기 - 연간총유출입량 및 연간유입회수 등 • 화학물질의 조성 및 종류 • 화학물질의 물리·화학적 성질 - 대부분의 물질에 대해서 내재화 되어 있음 • 기상정보 등 - 미국 내 도시를 기준으로 기상정보가 제공되어 있으며, 국내 대상지역에 대한 기상정보를 추가적으로 입력할 수 있음

3. 화학물질 발생량 산정 프로그램

석유저장탱크에서 발생할 수 있는 화학물질의 양을 산정할 수 있는 TANK 프로그램의 세부사항은 표 3과 같다.

4. 화학물질 농도 예측 프로그램

석유저장탱크 주변 주거지역에서의 화학물질의 농도는 K-SCREEN 모델을 활용하여 산정하였는데 수용점 자료, 모델 입력 조건 등은 아래와 같다.

1) 수용점

사업 시행으로 인한 영향예측은 “○○ 일반산업단지 조성사업” 환경영향평가서에 제시되어 있는 사업지구 인근 2,000m 이내의 주거지역 5개 지점을 대상으로 하였으며, 대상지역과 사업지구와의 이격거리, TM좌표 등은 아래 표에 나타내었다.

표 4. 영향예측 대상지역

지점명	이격거리(m)	TM좌표(km)	
		X	Y
주거지 ①	670	145.872	388.578
주거지 ②	1,290	147.167	388.872
주거지 ③	1,380	147.171	388.635
주거지 ④	1,700	147.601	388.784
주거지 ⑤	1,350	145.445	387.958

2) 입력조건

화학물질의 확산으로 인한 영향을 예측하기 위하

여 대기확산모델 중 대표적인 스크리닝 모델인 K-SCREEN 모델을 활용하였다. K-SCREEN 모델은 최악의 기상을 선정하여 보수적인 농도를 예측하는 비교적 간단한 모델로서, 실제로 발생할 수 있는 최악의 경우를 예측한다는 점이 중요한 의미를 갖는다. 또한 동 모델은 기상입력자료를 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 있는 장점을 가지고 있다(한국환경정책·평가연구원, 1998).

K-SCREEN을 실행하기 위해서는 여러 가지 입력조건들을 설정해 주어야 한다. TANK 2000 프로그램으로부터 예측된 저장탱크의 유해화학물질 발생량을 토대로 이격거리별 확산농도를 계산하기 위하여 본 연구에서는 다음과 같은 모델 입력조건을 적용하였다.

- ① 배출원 형태: 면오염원
- ② 대상오염물질
 - 발암성 물질: 벤젠
 - 비발암성 물질: 톨루엔, 에틸벤젠, m-자일렌¹⁾, n-헥산, 시클로헥산

1) 자일렌에는 ortho, meta, para-자일렌 세 종류가 있는데 U.S. EPA에서는 m-자일렌의 호흡참고치만을 제공하고 있어 m-자일렌만 검토함

- ③ 배출량: TANK 2000 프로그램 결과 활용
 - K-SCREEN 모델에 입력되는 배출량 단위는 g/sec · m² 단위이기 때문에 TANK 2000 프로그램으로 산출한 발생량을 저장탱크 면적(387,780m²)으로 나누어 배출량을 산출함
- ④ 사업면적: 저장탱크 설치 지역을 장축과 단축 길이가 동일한 정사각형으로 가정하였음
 - 매립면적: 387,780m², 장축 및 단축길이: 622m
- ⑤ 농도 계산 지점: 영향예측 대상지역(주거지
 - ①, ②, ③, ④, ⑤)의 이격거리 적용
- ⑥ 배출원 높이: 0m
- ⑦ 농도 계산 높이: 2m
- ⑧ 도시 및 시골 옵션: 시골(rural)옵션 선택
- ⑨ 연기침강(fumigation): 대상지역이 해안가에 위치하고 있어 연기침강 현상을 고려함

K-SCREEN 모델의 결과는 보통 1시간평균 가중농도를 제공해 준다. 이로부터 24시간평균 또는 연평균 가중농도를 계산하기 위해서는 1시간평균 가중농도에 환산계수를 곱하여 산정할 수 있다. 표 9는 미국환경보호청에서 1시간평균 농도를 3시간, 8시간, 24시간, 1년평균 농도로 전환하는 데 사용하고 있는 환산계수를 나타낸 것이다(미국환경보호청, 1992).

표 5. 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)

5. 위해성 평가 방법

1) 비발암성 물질

비발암성 물질의 위해도를 계산하기 위해서 위해도 지수(HQ, Hazard Quotient)를 이용할 수 있는데 대상지역의 물질별 위해도 지수는 대기확산모델로 계산한 예측농도를 호흡노출참고치(RfC; Reference Concentration)²⁾로 나누어 계산할 수

있으며, 식은 아래와 같다.

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

여기서,

$$\text{호흡노출참고치}(\mu\text{g}/\text{m}^3) = \frac{\text{NOAEL or LOAEL}(\mu\text{g}/\text{m}^3)}{\text{uncertainty factor} \times \text{첨가상수}(MF)}$$

비발암성 물질의 위해도 지수는 그 값이 1을 초과하는 경우에는 유해 영향(독성)이 발생할 가능성을 제시해 주며, 1 이하인 경우에는 안전역에 속해 있음을 제시해 준다.

2) 발암성 물질

원유 저장탱크에서 배출되는 유해물질 중 발암성 물질인 벤젠에 대해서는 크게 두 가지 방법으로 계산할 수 있다. 첫째는 국가대기환경기준과의 비교이다. 둘째는 호흡단위위해도를 이용하는 방법이다. 현재 환경부에서 진행하고 있는 건강영향평가에서는 국가환경기준이 있는 대기오염물질의 경우는 국가환경기준과의 비교만으로 건강에 미치는 영향을 판단하는 것으로 정하고 있다(환경부, 2007). 하지만 벤젠의 경우는 EPA의 발암성 여부 판별기준에 의거 A 그룹³⁾에 속해 있으며(표 12 참조) 벤젠

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)

2) 호흡노출참고치는 미국환경보호청 자료를 인용하였음 (www.epa.gov/IRIS/subst)

3) EPA 발암성 판별기준에 따른 A 그룹은 “Human carcinogen(sufficient evidence of carcinogenicity in humans)”임.

의 호흡노출로 인한 백혈병 유발에 관한 역학 자료가 다수 보고되고 있어 호흡단위위해도를 이용한 방법도 함께 검토하였다.

III. 연구결과

1. 화학물질 발생량 산정

석유저장탱크에서 배출되는 화학물질의 발생량은 TANK 프로그램 내 식들을 활용하여 산정하였다.

외부부상덮개 탱크에서의 화학물질 발생량은 아래의 식을 이용하여 계산할 수 있다. 표 7, 표 8은 각각 rim seal과 deck fitting에서 배출되는 발생량을 산정하는 데 필요한 인자들로서 TANK 프로그램에서 제공하고 있다.

표 7. 부상덮개탱크의 rim seal 배출인자인 KRa, KRb, n

탱크의 구조와 RIM SEAL 장치	평균 fitting seal		
	KRa	KRb	n
용접 탱크			
Mechanical shoe seal			
Primary only(일차)	5.8	0.3	2.1
Shoe-mounted(이차)	1.6	0.3	1.6
Rim-mounted(이차)	0.6	0.4	1
Liquid-mounted seal			
Primary only(일차)	1.6	0.3	1.5
Weather shield	0.7	0.3	1.2
Rim-mounted(이차)	0.3	0.6	0.3
Vapor-mounted seal			
Primary only(일차)	6.7	0.2	3
Weather Shield	3.3	0.1	3
Rim-mounted(이차)	2.2	0.003	4.3
리벳 탱크			
Mechanical shoe seal			
Primary only(일차)	10.8	0.4	2
Shoe-mounted(이차)	9.2	0.2	1.9
Rim-mounted(이차)	1.1	0.3	1.5

$$L_T = L_R + L_{WD} + L_F$$

여기서

L_T = 부상덮개 탱크에서의 총 발생량 (kg/yr)

L_R = rim seal 발생량 (kg/yr)

L_{WD} = withdrawal 발생량 (kg/yr)

L_F = deck fitting 발생량 (kg/yr)

각각의 발생량 산정 식 및 세부적인 인자들은 아래와 같다.

Rim Seal 배출, L_R

$$L_R = 1.49 * [K_{Ra} + K_{Rb}(v/1.609)^n] DP * M_V K_C$$

여기서,

K_{Ra} = 풍속 0에서의 rim seal 배출인자

K_{Rb} = 풍속에 따른 rim seal 배출인자

v = 탱크 주변의 평균풍속, km/h

(기상자료가 없을 경우 14.4km/h 사용)

(내부부상덮개나 돔 외부부상 덮개탱크일 경우는, $v=0$)

n = seal과 관련된 풍속지수, 무차원

P^* = 증기압함수, 무차원

$$P^* = \frac{P_{VA}/760}{[1 + (1 - [P_{VA}/760])^{0.5}]^2}$$

여기서,

P_{VA} = 일간액체표면온도에서의 증기압, mmHg

D = 탱크의 지름, m

M_V = 평균 증기분자량

K_C = 생산인자 (원유에 대해서는 0.4, 기타 액체유기화학물질은 1을 적용)

Withdrawal 발생, L_{WD}

$$L_{WD} = \frac{1.14 Q C W_L}{D} \left[1 + \frac{N_c F_c}{D} \right]$$

여기서,

L_{WD} = withdrawal 발생량, kg/yr

Q = 연간유출입량(탱크 용량[bb]에 연간유입회수를 곱한 값), m³/yr

C = 벽 접착인자(부상덮개가 하강하였을 때 벽에 달라붙어 남아 있는 액체의 양), (벽면이 녹이 약간 스는 경우는 0.0015, 녹이 많이 스는 경우는 0.0075, 콘크리트로 표면처리 되어 있는 경우는 0.15를 사용한다, 원유를 저장하는 경우에는 각 경우의 벽 접착인자 값에 4를 곱하여 사용한다.)

W_L = 액체평균밀도, kg/l

D = 탱크의 지름, m

N_c = 고정덮개의 지지칼럼의 수, 무차원

(자체 지지 고정덮개탱크와 외부부상덮개탱크의 경우는 $N_c = 0$)

F_c = 지지칼럼의 유효 지름, m (봉 둘레의 길이[m]/ π)

- 탱크 설계자료로부터 특정 유효지름을 (F_c = 봉 둘레의 길이[m]/ π) 계산하여 사용하거나, 아래의 식을 사용한다.

표 8. deck fitting 배출인자, KFa, KFb, m

Fitting 형태	자세한 구조	KFa	KFb	m
Access Hatch (24-in. Diameter well)	Bolted Cover, Gasketed	1.6	0	0
	Unbolted Cover, Gasketed	31	5.2	1.3
	Unbolted Cover, Ungasketed	36	5.9	1.2
Fixed Roof Support Column Well (24-in. Diameter well)	Built-Up Col., Gasketed Sliding Cover	33	0	0
	Built-Up Col., Ungasketed Sliding Cover	47	0	0
	Round Pipe Col., Flexible Fabric Sleeve Seal	10	0	0
	Round Pipe Col., Gasketed Sliding Cover	25	0	0
Unslotted Guide-Pole Well (24-in. Diameter unslotted pole, 21-inch diameter well)	Round Pipe Col., Ungasketed Sliding Cover	31	0	0
	Ungasketed Sliding Cover	31	150	1.4
	Gasketed Sliding Cover	25	13	2.2
	Ungasketed Sliding Cover w/pole Sleeve	25	2.2	2.1
	Gasketed Sliding Cover w/pole Sleeve	8.6	12	0.81
Slotted Guide-Pole/Sample Well (8-in. Diameter slotted pole, 21-inch diameter well)	Gasketed sliding Cover w/pole Wiper	14	3.7	0.78
	Ungasket. Sliding Cover, with Float	31	36	2
	Ungasketed Sliding Cover	43	270	1.4
	Gasketed Sliding Cover, with Float	31	36	2
	Gasketed Sliding Cover, with Pole Wiper	41	48	1.4
	Gasketed Sliding Cover, with Pole Sleeve	11	46	1.4
	Gasketed Sliding Cover, with Float and pole Wiper	21	7.9	1.8
	Gasketed Sliding Cover, with Float, Pole Sleeve, and Wiper	11	9.9	0.89
Float Well (Automatic Gauge)	Gasketed Sliding Cover, with Pole Sleeve and Pole Wiper	8.3	4.4	1.6
	Bolted Cover, Gasketed	2.8	0	0
	Unbolted Cover, Gasketed	4.3	17	0.38
Roof Leg or Hanger Well	Unbolted Cover, Ungasketed	14	5.4	1.1
	Adjustable	7.9	0	0
Sample Pipe or Well (24-in. Diameter)	Fixed	0	0	0
	Slotted Pipe-Sliding Cover, Gasketed	43	0	0
	Slotted Pipe-Sliding Cover, Ungasketed	43	0	0
Stub Drain (1-in. Diameter)	Slit Fabric Seal 10% Open	12	0	0
		1.1	0	0
Vacuum Breaker (10-in. Diameter)		6.2	1.2	0.94
	Weighted Mechanical Actuation, Gasketed	7.8	0.01	4
Gauge-Hatch/Sample Well (8-in. Diameter)	Weighted Mechanical Actuation, Ungasketed	0.47	0.02	0.97
		2.3	0	0
	Slit Fabric Seal, 10% Open Area	12		
Deck Drain (3-in. Diameter)	Open	1.5	0.21	1.7
	90% Closed	1.8	0.14	1.1
Deck Leg (3-in. Diameter)	Adjustable, internal floating deck	7.9		
	Adjustable, Pontoon Area, Ungasketed	2	0.37	0.91
	Adjustable, Center Area, Ungasketed	0.82	0.53	0.14
	Adjustable, Double-Deck Roofs	0.82	0.53	0.14
	Fixed	0	0	0
	Adjustable, Pontoon Area, Gasketed	1.3	0.08	0.65
	Adjustable, Pontoon Area, Sock	1.2	0.14	0.65
	Adjustable, Center Area, Gasketed	0.53	0.11	0.13
Rim Vent (6-in. Diameter)	Adjustable, Center Area, Sock	0.49	0.16	0.14
	Weighted Mechanical Actuation, Gasketed	0.71	0.1	1
Ladder Well(36-in. Diam.)	Weighted Mechanical Actuation, Ungasketed	0.68	1.8	1
	Sliding Cover, Ungasketed	76	0	0
	Sliding Cover, Gasketed	56	0	0

$F_c = 0.33$ (7~9 인치 조립 지지칼럼의 경우),
 0.21 (8인치 파이프 관의 경우),
 0.3 (만약 칼럼에 대해서 자세한 정보가 없는 경우)

Deck Fitting 발생, L_F

$$L_F = F_F P^* M_V K_C$$

여기서,

L_F = deck fitting 발생량, kg/yr

P^* , M_V , K_C 는 앞 페이지의 정의를 따름

F_F = 총괄 deck fitting 배출인자

여기서,

N_{Fi} = 특정 형태의 deck fitting의 수($i=0,1,2,\dots,nf$), 무차원

K_{Fi} = 특정 형태의 fitting에 대한 deck fitting 배출인자($i=0,1,2,\dots,nf$),

n_f = fitting 종류의 수, 무차원

$$K_{Fi} = K_{Fai} + K_{Fbi}(K_v v)^{mi}$$

여기서,

K_{Fi} = 특정형태의 fitting에 대한 deck fitting 배출인자

K_{Fai} = 특정 형태의 fitting에 대한 풍속 0에서의 배출인자

K_{Fbi} = 특정 형태의 fitting에 대한 풍속에 따른 배출인자

m_i = 특정 형태의 deck fitting에 대한 배출인자지수, 무차원

$i = 1, 2, \dots, n$, 무차원

$K_v = 0.7$, fitting의 풍속 보정인자, 무차원

v = 평균주변풍속, km/h (내부부상덮개탱크 및 돔 외부부상덮개탱크는 $v=0$)

상기의 식들을 이용하여 산정한 저장탱크에서의 화학물질별 발생량은 아래의 표 9 및 표 10과 같다.

표 9. 저장탱크에서의 배출량

Rim Seal 배출량(Lr)	Withdrawal 배출량(Lwd)	Deck Fitting 배출량(Lf)	전체 배출량(Lt)
1478.284	349.619	5.645	1833.548

2. 주거지역에서의 화학물질의 농도

1) 비발암성 물질

비발암성 물질인 톨루엔, 에틸벤젠, m-자일렌, n-헥산, 시클로헥산에 대해 K-SCREEN 모델을

4) ○○지방산업단지 내 ○○뱅크(주)의 석유정제공장은 저장탱크를 6기 건설할 예정이므로 1기에 해당하는 배출량 산정치에 6을 곱하여 전체 배출량을 산정하였음.

표 10. 원유에 함유된 화학물질 배출량

화학물질명	조성(%)	배출량(kg/yr)				
		Lr	Lwd	Lf	Lt	Lt × 6 ⁴⁾
n-헥산	0.40	16,746	1,398	0.064	18,209	109,254
벤젠	0.60	15,391	2,098	0.059	17,548	105,288
이소옥탄	0.10	0.024	0.350	0.000	0.374	2,244
톨루엔	1.00	7,468	3,496	0.028	10,992	65,952
에틸벤젠	0.40	0.968	1,398	0.004	2,370	14,220
m-자일렌	1.40	2,962	4,895	0.011	7,868	47,208
이소프로필 벤젠	0.10	0.112	0.350	0.000	0.462	2,772
1,2,4-트리메틸벤젠	0.33	0.172	1,154	0.001	1,327	7,962
시클로헥산	0.70	18,877	2,447	0.072	21,396	128,376

표 11. K-SCREEN 모델 실행결과(비발암성 물질)

지점명	이격거리(m)	톨루엔($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	에틸벤젠($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	m-자일렌($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	n-헥산($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	시클로헥산($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
주거지 ①	670	0.3814	0.0823	0.2730	0.6319	0.7425
주거지 ②	1,290	0.2165	0.0467	0.1550	0.3587	0.4215
주거지 ③	1,380	0.2058	0.0444	0.1473	0.3409	0.4006
주거지 ④	1,700	0.1761	0.0380	0.1261	0.2918	0.3428
주거지 ⑤	1,350	0.2092	0.0451	0.1497	0.3466	0.4073
최고농도 발현지점	446	0.5457	0.1177	0.3905	0.9039	1.0620

실행한 결과 저장탱크 유해화학물질 발생량이 가장 많았던 시클로hex산이 5개 지역 모두에서 가장 높은 농도를 보였고, 대상지역 중 가장 고농도를 보인 지역은 사업지구와 670m 이격된 주거지 ①인 것으로 나타났다. 주거지 ①에서의 톨루엔, 에틸벤젠, m-자일렌, n-hex산, 시클로hex산의 농도는 각각 0.38, 0.08, 0.27, 0.63, 0.74 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다.

2) 발암성 물질

발암성 물질 역시 비발암성 물질과 마찬가지로 주거지 ①에서 가장 높은 농도가 나타났다. 주거지 ①에서의 발암성 물질인 벤젠의 농도는 0.61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 계산되었다.

3. 위해성 평가

1) 비발암성 물질

본 연구의 대상이 되는 톨루엔, 에틸벤젠, m-자일렌, n-hex산, 시클로hex산에 대해 대상마을별로 위해도 지수를 계산해 본 결과(표 12), 모두 10^{-2} 이하로 위해성이 있다고 판별할 수 있는 기준인 1 보다 상당히 낮은 수치를 보였다. 이는 대상지역에서 비발암물질로 인한 위해도는 그다지 유의할 수준이 아닌 안전한 수준인 것임을 나타낸다. 다만, 비발암성 물질 중 아이소옥탄, 아이소프로필 벤젠, 1,2,4-트리메틸벤젠의 경우는 호흡참고치를 산출할 수 없기 때문에 이에 대한 위해도 지수를 산출할 수 없었다.

표 12. K-SCREEN 모델 실행결과(발암성 물질)

지 점 명	이격거리(m)	벤젠 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
주거지 ①	670	0.6090
주거지 ②	1,290	0.3457
주거지 ③	1,380	0.3286
주거지 ④	1,700	0.2812
주거지 ⑤	1,350	0.3340
최고농도 발현지점	446	0.8711

2) 발암성 물질

(1) 국가대기환경기준과의 비교

벤젠의 국가대기환경기준은 연평균 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다. 표 13에 나타난 것처럼 벤젠의 농도가 가장 높

게 나타나는 지점은 탱크로부터 446m 이격된 곳이었으며 그 지점에서의 벤젠의 농도는 0.8711 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 였다. 스크리닝 모델로서 계산된 농도는 보통 1시간 평균 농도이며 EPA 자료에 따르면 연간 농도에 비하여 대략 12.5배 정도 높은 것으로 볼 수 있다. 따라서 최대착지지점의 연평균 농도는 0.07 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 국가기준보다 훨씬 낮음을 알 수 있다.

(2) 호흡단위위해도를 이용하는 방법

발암위해도(CR; Cancer Risk)는 호흡단위위해도와 예측농도를 곱하여 산정하였다. 호흡단위위해도는 사람이 대기 중에서 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도로 존재하고 있는 오염물질을 평생 동안 흡입했을 때, 발암가능성의 상한값으로서 벤젠의 경우 $7.8 \times 10^{-6} (\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$ 이다.

현재 미국환경보호청에서의 발암 물질에 대한 권고기준은 100만 명 당 1명(1×10^{-6})의 초과발암위해도가 발생하는 수준으로 정하고 있다. 반면, 세계보건기구(WHO)에서는 10만 명 당 1명(1×10^{-5})의 초과발암위해도가 발생하는 수준으로 결정하고 있고 캐나다의 경우도 세계보건기구와 마찬가지로 10만 명 당 1명(1×10^{-5})의 초과 발암위해도를 기준으로 하고 있다. 상기의 결과를 미국의 발암위해도 기준과 비교할 경우는 발암가능성이 있는 것으로 해석할 수 있으며 캐나다나 WHO의 기준을 적용할 경우에는 별 문제가 없는 것으로 해석할 수 있다. 우리나라의 경우 “건강영향 항목의 검토 및 평가에 관한 업무처리 지침(환경부 예규 제 400호)”에는 “발암성 물질은 발암위해도가 10^{-6} 을 초과할 경우 저감대책을 수립한다. 단, 국내·외 수준을 고려하여 가능한 모든 대안을 검토한 이후에도 10^{-6} 을 초과하는 경우에는 평가기준을 10^{-5} 으로 적용할 수 있다”라고 발암위해도 기준을 정하고 있다. 따라서 이 경우 사업자는 우선적으로 저감대책을 강구하여 10^{-6} 을 달성할 수 있도록 하는 것이 바람직한 것으로 결론내릴 수 있다.

표 13. 비발암성 물질의 위해도 지수

오염물질	대상마을	호흡참고치	노출농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	위해도 지수
톨루엔	주거지 ①	5,000	0.3814	7.63E-05
	주거지 ②	5,000	0.2165	4.33E-05
	주거지 ③	5,000	0.2058	4.12E-05
	주거지 ④	5,000	0.1761	3.52E-05
	주거지 ⑤	5,000	0.2092	4.18E-05
	최고농도 발현지점	5,000	0.5457	1.09E-04
에틸벤젠	주거지 ①	1,000	0.0823	8.23E-05
	주거지 ②	1,000	0.0467	4.67E-05
	주거지 ③	1,000	0.0444	4.44E-05
	주거지 ④	1,000	0.0380	3.80E-05
	주거지 ⑤	1,000	0.0451	4.51E-05
	최고농도 발현지점	1,000	0.1177	1.18E-04
m-자일렌	주거지 ①	100	0.2730	2.73E-03
	주거지 ②	100	0.1550	1.55E-03
	주거지 ③	100	0.1473	1.47E-03
	주거지 ④	100	0.1261	1.26E-03
	주거지 ⑤	100	0.1497	1.50E-03
	최고농도 발현지점	100	0.3905	3.91E-03
n-헥산	주거지 ①	700	0.6319	9.03E-04
	주거지 ②	700	0.3587	5.12E-04
	주거지 ③	700	0.3409	4.87E-04
	주거지 ④	700	0.2918	4.17E-04
	주거지 ⑤	700	0.3466	4.95E-04
	최고농도 발현지점	700	0.9039	1.29E-03
시클로헥산	주거지 ①	6,000	0.7425	1.24E-04
	주거지 ②	6,000	0.4215	7.03E-05
	주거지 ③	6,000	0.4006	6.68E-05
	주거지 ④	6,000	0.3428	5.71E-05
	주거지 ⑤	6,000	0.4073	6.79E-05
	최고농도 발현지점	6,000	1.0620	1.77E-04
아이소옥탄 아이소프로필 벤젠 1,2,4-트리메틸벤젠	RfC 값이 없어 위해도 지수를 산출할 수 없었음			

표 14. 벤젠 발암위해도 산정결과

지 점 명	이격거리(m)	농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	호흡단위위해도($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ⁻¹	발암위해도
주거지 ①	670	0.6090	7.8×10 ⁻⁶	4.68×10 ⁻⁶
주거지 ②	1,290	0.3457		2.67×10 ⁻⁶
주거지 ③	1,380	0.3286		2.56×10 ⁻⁶
주거지 ④	1,700	0.2812		2.17×10 ⁻⁶
주거지 ⑤	1,350	0.3340		2.6×10 ⁻⁶
최고농도 발현지점	446	0.8711		6.8×10 ⁻⁶

IV. 결론 및 논의

석유정제시설의 석유화학제품 저장탱크에서 배출되는 다양한 비발암물질과 발암물질에 대한 위해

도 평가 결과 비발암물질은 모두 위해도 지수를 만족하는 것으로 나타났으나 벤젠의 발암위해도는 기준(10⁻⁶)을 약간 초과하는 것으로 나타났다. 따라서 벤젠의 배출량을 저감할 수 있도록 대책을 수립하

는 것이 필요하다. 그러나 상기의 평가 결과는 저감 시설 설치 전의 경우를 평가한 것이며 발암위해도를 약간 초과하는 점으로 미루어 보아 「대기환경보전법」에 따른 석유정제시설에서의 VOCs 저감대책을 수립한다면 환경기준을 만족할 수 있을 것으로 기대된다.

또한 금번 연구에서 적용한 평가방법은 석유정제 시설뿐만 아니라 유해화학물질이 배출될 수 있는 시설에 대한 정량적 건강영향평가 기법으로도 활용 가능한 것으로 생각된다.

다만, 본 연구에서 제시한 결과는 몇 가지 한계점이 있다. 첫째는 위해도 평가 시 활용한 호흡단위위해도 및 호흡노출참고치 등에 대해 활용 가능한 국내 자료가 없다는 점이다. 따라서 본 연구에서는 미국환경보호청 자료를 활용하였으나, 동 자료가 국내 실정과는 다를 수 있어 결과 해석에 차이가 발생할 수 있는 제한은 있다. 이 점에 대해서는 국가 차원에서 지속적인 연구와 자료 축적이 요구된다. 둘째는 보수적인 계산을 위하여 대기확산모델 중 K-SCREEN 모델을 활용하여 결과를 예측하였으나 보다 정확한 결과를 예측하기 위해서는 당해 사업 지구의 부지기상자료 등과 미국환경보호청의 추천 모델인 AERMOD, CALPUFF, CMAQ 등을 활용한다면 보다 신뢰성 있는 예측값을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

마지막으로 본 연구에서 수행한 화학물질의 호흡노출로 인한 위해도평가 기법은 향후 산업단지, 소각로, 발전소 등 대기오염물질이 다량 배출되는 사업에 대한 의사결정자들과 일반대중의 합리적 의사결정에 도움이 될 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

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

참고문헌

- 김영하, 최상기, 이영수, 2009, 소각로 건설사업에 대한 건강영향평가 사례 연구, 환경영향평가학회지, 18(1), 11-19.
- 전용택, 양원호, 유승도, 이종대, 손부순, 2008, 일부 공단지역 내 이산화질소의 개인노출 농도 및 건강위해성 평가, 한국환경보건학회지, 34(3), 199-206.
- 환경부, 2007, 건강영향평가 기법개발 및 시범사업 연구(I), 환경부.
- 환경부, 2008, 건강영향평가 기법개발 및 시범사업 연구(II), 환경부.
- 환경부, 2009, 건강영향평가 기법개발 및 시범사업 연구(III), 환경부.
- 한국환경정책·평가연구원, 1998, 사업특성별 환경영향평가를 위한 모델의 비교연구, 한국환경정책·평가연구원.
- Alex Hirschfield, Debbie Abrahams, Ruth Barnes, Judith Hendley, 2001, “Health Impact Assessment : Measuring the effect of Public Policy in Variations in Health”. The Association of Public Health Observatory.
- British Medical Association, 1998, Health and Environmental Impact Assessment: an Integrated Approach.
- CEAA, 2004, Canadian Handbook on Health Impact Assessment Vol. 4.
- Cooper Weil *et al.*, 1990, “The Impact of development policies health : a review of the literature.” WHO Geneva.
- Commonwealth of Australia, 2001, Health Impact Assessment Guidelines.
- Department of Health, 2007, Draft Guidance on Health in Strategic Environmental Assessment : a Consultation.
- 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.epa.gov/ncea/iris>
- WHO, 2001a, Health Impact Assessment in Development Policy and Planning.
- WHO, 2001b, Health Impact Assessment as Part of Strategic Environmental Assessment. <http://www.epa.gov/ttnchie1/software/tanks>

최종원고채택 10. 06. 14