



기술자료

영남권 유해화학물질의 대기배출특성 - 건강위해성을 중심으로

Emission Characteristics of Airborne Toxic Chemicals in Yeongnam Region - Focusing on Health Risks

김준영, 백성옥*

영남대학교 대학원 환경공학과

Jun-Young Kim, Sung-Ok Baek*

Department of Environmental Engineering, Graduate School of Yeungnam University

접수일 2019년 6월 6일
 수정일 2019년 6월 25일
 채택일 2019년 6월 26일

Received 6 June 2019
 Revised 25 June 2019
 Accepted 26 June 2019

*Corresponding author
 Tel : +82-(0)53-810-2544
 E-mail : sobaek@yu.ac.kr

Abstract In this study, a wide range of chemical emission data collected by the PRTR survey in 2012 and 2013 were analyzed with respect to their spatial distributions and toxicity. The PRTR survey system adopted in Korea and other countries were also reviewed. When the total amount of chemicals were broken down by the five regions in Korea, the largest amount of chemicals (approximately 50% of the nationwide total) was emitted from the Yeongnam region. In order to combine the emission amount with toxicological information, the chemicals were first classified into two groups, i.e., potential carcinogenic and non-carcinogenic compounds. Subsequently, the unit risk (UR) value was multiplied to the emission data of a specific carcinogenic compound, while the reference concentration (RfC) was divided by the emission data of a non-carcinogenic chemical. The former was defined in this study as the 'risk weighted emission', and the latter as the 'hazard-weighted emission'. There were a total of 165 kinds of chemical substances emitted from the Yeongnam region, including mainly organic solvents, such as xylenes, toluene, and ethylbenzene. Amongst them, 36 and 58 compounds were found to be potential carcinogenic and non-carcinogenic chemicals, respectively. The rankings of risk/hazard-weighted emissions for the target chemicals were substantially different from them of the absolute emissions. These results imply that the importance of the risk-weighted emission information should be emphasized in the selection of priority chemicals to be controlled in a particular region. Although the Korean PRTR survey provide many useful information, it still needs to be improved to include even smaller industries in order to refine the emission data of hazardous air pollutants (HAPs). A comprehensive ambient air monitoring of HAPs in the major industrial complexes can play a complementary role in the validation of the PRTR data, of which some important chemicals might be missed from the industries' self report.

Key words: PRTR, HAPs, Air toxics, VOCs, Health risk

1. 서 론

현대사회에서는 경제성장과 국민들의 삶의 질에 대한 욕구가 커지면서 갈수록 다양한 화학물질들이 많이 사용되고 있다. 현재 전 세계적으로 12만여 종의 화학물질이 유통되고 있으며, 매년 2천여 종의 새로운 화학물질이 개발되고 있다. 그 중 국내에는 4만

4천 종 이상의 화학물질이 유통되고 있고, 매년 300여 종 이상이 새로이 국내시장에 유통되고 있다(MOE, 2016a). 이와 같이 산업체에서 사용되는 많은 화학물질의 배출량을 파악하고 관리하기 위해서 만든 제도가 화학물질 배출·이동량(Pollutant Release and Transfer Registers, PRTR) 조사이다. 2012년 현재 국내의 대기오염물질 배출업소 현황은 총 48,035개 소

가 있으며, 그 중 1종이 1,144개 소, 2종 1,276개 소, 3종 1,907개 소, 4종 14,953개 소, 5종 28,755개 소가 등록되어 있다(MOE, 2013). 사업장의 보고 업체 수는 매년 늘어나는 추세이며, 화학물질의 취급량과 배출량 비율은 감소하는 추세를 나타내고 있다. 또한, 사업장 내에서 화학물질이 배출되는 경로는 약 99%가 대기 중으로 배출되고 있다고 보고된 바 있다(MOE, 2016b).

대기로 배출되는 화학물질 중에는 유해대기오염물질(Hazardous Air Pollutants, HAPs)이 많이 포함되어 있으며, HAPs는 생체농축성, 환경잔류성, 및 독성을 가진 물질들이 대부분이다. 또, 이들 물질들은 저농도에서도 장기간 노출되면 건강상 피해를 유발할 수 있다고 알려져 있다. HAPs가 대기 중으로 배출되어 호흡을 통해 인체에 흡수되어 직접적인 피해를 줄 수 있으므로 HAPs의 배출억제를 위한 기술적, 법적 방안이 필요한 실정이다.

국내의 PRTR 자료는 현재는 단순히 화학물질의 배출량만 발표하고 있으며, 노출정도, 분해정도, 잔류성 등 위해성 관련 정보는 아직 마련되지 못하고 있다(Kim, 2017). 또한, 위해성을 고려한 화학물질 배출량을 추계하고, HAPs의 위해성평가를 통하여 지역별로 특징적인 우선관리물질을 선정하는 것은 국민 건강 보호를 위하여 매우 중요한 작업이다. 중점 관리 대상물질의 선정을 단순 배출량에만 의존하는 단계에서 나아가 지역별로 위해성을 고려한 관리대상 물질을 선정하게 되면 저예산으로도 인체에 미치는 영향을 최소화 할 수 있는 효율적인 정책을 개발할 수 있을 것이다.

대구·경북과 부산·울산·경남지역을 포함하는 영남권에는 철강, 조선, 전자, 석유화학 등 다양한 업종으로 특화된 대규모 산업단지가 많이 위치하고 있어 상당한 양의 유해물질이 배출될 것으로 예상된다(KICC, 2017). 따라서 본 연구에서는 각국의 PRTR 제도를 고찰하고, 국내 PRTR 자료를 대상으로 전국적 배출량과 아울러 영남권 중심의 사업장에서 대기로 배출되는 화학물질을 중점적으로 조사하였다. 나아

가 이들 배출량에 독성 정보를 이용하여 발암성과 비발암성으로 구분하여 각 그룹의 배출 특성을 위해성 측면에서 조사하였다. 최종적으로 배출량에 독성정보 자료를 접목한 위해가중배출량을 추산하여 어떤 물질이 영남권 지역주민들에게 건강상 피해를 많이 주는 물질인지를 파악하고 그에 대한 적정 관리 방안을 제안하고자 하였다.

2. 주요 국가의 PRTR 제도 비교

화학물질 배출량 조사제도(PRTR)는 1992년에 브라질에서 열린 리우데자네이로(리우회의)에서 필요성이 최초로 제기되어 OECD는 1996년 'PRTR 지침서'를 개발하고 'PRTR 도입에 대한 이사회권고안'을 채택하였다(OECD, 2014). 이에 따라 1997년 OECD의 각 회원국들은 이사회권고에 의해 각국의 특성에 맞게 PRTR 제도를 도입하고 그 이행계획을 수립하게 되었다. OECD는 PRTR의 기준을 국가별로 특성에 맞게 설정하여 운영하고 있으며, OECD 사무국은 지역별 특징적인 PRTR시스템을 비교할 수 있도록 국가별 조사기준을 검토하고 필요시 이를 수정하도록 권고하고 있다(Shin, 2016).

2.1 우리나라의 PRTR 제도

국내 PRTR 제도는 사업장에서 제품을 제조하는 데 사용되는 화학물질이 수질, 대기, 토양 등 환경으로 배출되는 양을 파악하기 위한 제도이다. 환경으로 배출되는 양을 파악하고 제품이나 원료의 배출 손실을 기업이 자발적으로 줄여 환경오염을 최소화하고 기업의 생산성을 향상시키는 목적을 가지고 있다. 화학물질 배출량 조사제도가 도입된 배경으로는 1996년 OECD에 가입하면서 OECD의 PRTR 제도 도입을 약속하였다. 이에 따라 '유해화학물질 관리법'을 개정하여 필요한 법적 근거를 마련하고 화학물질 배출량을 조사하게 되었다. 현재는 '유해화학물질 관리법'에서 '화학물질관리법'으로 변경되었으며, '화학물질관리

법' 제11조, 동법 시행규칙 제5조 및 '통계법' 제18조, 동법 시행령 제24조, 동법 시행규칙 제12조, 환경부 고시 제 2014-255호에 의해서 조사되고 있다(MOE, 2016c).

환경부는 화학물질 배출량 조사제도를 도입 후 국내 22개 업체를 대상으로 시범사업을 실시하였다. 시범사업 결과, 배출량 산정기법을 개발필요성이 제기되어 1997년부터 1999년까지 석유정제, 화학, 자동차 등 23개 업종에 대해 배출량산정기법을 마련하였으며, 2001년부터 2002년 1년 동안 비점오염원 배출량 산정기법을 개발하였다. 그 후로도 휘발성물질 등 물질군별 배출량 산정지침과 섬유염색·금속수조·정밀화학업 등 업종별 배출량 산정지침을 마련한 바 있다(PRTR, 2016).

화학물질 배출량 조사제도는 조사대상 업종, 화학물질 및 사업장 규모(종업원 수)의 기준을 두고 보고 업체를 선정하고 있다. '대기환경보전법'과 '수질 및 생태계 보전에 관한 법률'에 의해 배출 시설의 설치 및 신고를 한 업종 중 한국표준산업분류에 해당되는 41개 업종이 해당하며, 사업장 규모는 종업원 수 30인 이상이 대상이었지만, 2012년 구미 불산 사고 이후 2013년부터 1인 이상으로 조사대상이 강화되었다. 조사대상 물질은 시행 초기엔 80여 종이 해당하였으며, 2016년 기준으로 415종까지 확대되었다(MOE, 2015).

조사대상 화학물질의 경우 I그룹과 II그룹으로 기준이 설정하고 있다. 사업장에서 생산되는 화학물질 및 제품, 원료 및 첨가제, 폐기물처리사업장에서 처리되는 폐기물, 사업장에서 보관 또는 저장하는 화학물질 등이 I그룹에 해당하는 물질(16종)은 연간 1톤 이상, II그룹에 해당하는 물질(399종)은 연간 10톤 이상 되면 조사대상 업체에 해당된다. 하지만, 연구 또는 검사 등 제한된 장소에서 연구자에 의해서 사용되는 경우, 축전지와 같이 구입하여 사용하는 장치 내에 내장되어 있는 화학물질, 사업장 조정시설 등의 유지에 사용되는 살충제 및 비료 등은 조사대상에서 제외되는 사항이 있다(MOE, 2016c).

화학물질 배출량 조사제도는 배출원의 위치가 확실한 사업장을 대상으로 조사하지만, 소비·유통과정에서 배출되는 비점오염원을 파악하기 위해 매 4년마다 비점오염원에 대한 배출량조사를 실시하고 있다. 비점오염원조사는 2003년 농업분야·가정·이동발생원 등 9개 배출원, 240종의 화학물질에 대해서 1차 조사를 실시하였고 2007년에는 철도 등 15개 배출원, 388종의 화학물질을 대상으로 2차 조사가 진행되었다. 2011년에는 기존 15개 배출원에 이륜자동차, 선박, 건설기계의 비점오염원을 추가하여 3차 조사를 실시한 바 있다(MOE, 2015).

화학물질 배출량 조사절차는 기업에서 한 해 동안 제조한 제품이나 사용한 원료 등의 화학물질 양을 조사하여 배출량과 이동량 및 자가 매립량을 산정한다. 배출량은 한 해 사업장 내에서 대기, 수계, 토양으로 배출된 화학물질 양을 산정하고, 이동량은 사업장 밖으로 이동된 폐수 또는 폐기물에 함유된 화학물질의 양을 파악하여 폐수 및 폐기물 처리업체로 이동되는 양으로 구분하여 산정한다. 자가 매립량은 사업장 내에서 매립된 폐기물에 함유된 화학물질의 양으로 산정한다(MOE, 2016c). 산정 방법에는 직접측정법, 물질수지법, 배출계수법, 공학적 계산법이 있다. 첫 번째로 직접측정법은 실제로 배출되는 양을 실제로 측정하여 배출량을 산정하는 방법이다. 두 번째로 물질수지법은 질량 보존의 법칙인 물질수지 식을 이용하여 산정한다. 세 번째로 배출계수법은 특정시설에서의 배출량을 직접 측정하여 산출된 평균배출량 값을 이용하여 유사한 배출원에 적용하여 배출량을 산정하는 방법이다. 마지막으로 공학적 계산법은 물리·화학 법칙이나 이론 등을 이용하거나 공정설계자료, 생산 공정이나 오염방지시설의 특성을 이용하여 배출량을 산정하는 방법이다(Shin, 2016). 위와 같이 4가지 방법으로 산정된 배출량을 매년 4월 30일까지 관할 환경청에 제출하면 이를 취합·검토한 후 환경부로 보내진다. 환경부에서는 배출량 조사 자료를 DB화시킨 후 홈페이지와 조사보고서를 작성하여 국민에게 공개하고 있다.

2.2 미국의 TRI

미국의 유해화학물질 배출목표제도 (Toxic Release Inventory, TRI)는 1984년 인도 보팔에서 발생한 Union Carbide사의 methyl isocyanate 폭발사고와 관련해 유해화학물질에 대한 국민의 관심이 고조되면서 시행하게 되었다(USEPA, 2016a). TRI는 미국 정부의 ‘긴급명령 및 알 권리에 관한 법률(Emergency Planning and Community Right-to-Know Act)’을 법적 근거로 하여 지역 주민에게 유해화학물질 배출에 대한 정보를 제공하고 있다. TRI가 시행된 이후 연간 25,000개 사업체가 참여하고 있으며, 지금까지 80,000건 이상의 TRI 자료가 보고되었다. 미국 TRI의 조사 대상 화학물질은 인체에 유해하거나 발암성 또는 환경에 악영향을 미치는 물질 등이 속하며, 약 650여 종을 조사하고 있다(Shin, 2016). 최근에는 생체농축 및 잔류성 물질들을 조사대상물질에 포함시켜 보고기준을 강화하고 있다. 미국 EPA는 TRI를 시행한 결과 '88년에 많이 배출되는 화학물질 17종에 대하여 '92년까지 33%, '95년까지 50% 배출량 저감시키는 목표로 하는 33/50 프로그램을 시행하였으며, 이미 '91년에 그 목표를 초과하였다. 미국 화학제조협회는 TRI를 시행한 결과 '92년까지 배출량이 평균 38%로 감소하였으며 생산성은 오히려 8% 향상되었다고 보고하였다(Kim, 2017).

2.3 일본의 PRTR

일본은 1992년 리우선언 이후 OECD의 권고를 받아 PRTR 도입을 가속화 하였다. 1996년 PRTR 기술자문위원회를 설립하여 PRTR에 관한 기술적 사항을 조사 및 검토 시작하여 이를 바탕으로 1997년 PRTR 도입을 위한 시범사업을 추진하였다. 1999년 공포된 ‘특정화학물질의 환경에 대한 배출량 파악 등 관리개선 촉진에 관한 법률’에 따라 대상 사업자는 2001년부터 조사대상 화학물질의 배출량을 파악하고 2002년부터 매년 집계 결과가 국민에게 공표되고 있다(JMOE, 2016). 일본은 2016년 현재까지는 광업, 제조업, 전기·가스업, 이공계연구소 등 근로자가 21인 이상이고 462

종의 화학물질 취급량을 기준으로 조사대상을 선정하고 있다. 조사대상 물질은 제1종 지정화학물질과 특정 제1종 지정화학물질로 분류하고 있으며, 원료와 자재 등에 포함된 대상물질의 함유량과 연간 취급량에 대한 기준을 마련하고 있다. 제1종의 경우 함유량이 1%(w/w)이고 연간 1톤 이상, 특정 제1종 지정화학물질은 0.1% 함유량과 연간 0.5톤으로 설정하고 있다. 각 사업장은 직접 배출량을 산정하여 환경성에 보고하고 있고 운송, 농약살포 등 비점오염원의 배출량 산정은 환경성과 지방정부가 협조하여 산정하고 있다(JMOE, 2016).

2.4 캐나다의 NPRI

캐나다의 화학물질 배출량 조사제도(National Pollutant Release Inventory, NPRI)는 환경으로 배출되는 오염물질의 처리 및 재순환을 위한 이동량 조사제도이다. 캐나다의 ‘환경보호법’에 의거해 NPRI가 시행되고 있다(Statistics Korea, 2012). NPRI는 사업장에서 보고받은 자료를 이용하여 오염방지 우선순위를 확인하고, 독성물질 및 대기오염물질 배출량을 감소시키기 위해서 규제 개발에 사용된다. 또, 이들 자료는 위해성관리와 대기모델링 등에 지원된다. 2014년에 배관시설이나 폐수 수집 시스템이 있는 연속적인 시설 등 7,720개의 시설에서 신고하였고 총 343종의 물질이 관리되고 있다(NPRI, 2016).

2.5 OECD 회원국의 PRTR 조사기준 비교

OECD 회원국 중 미국, 일본, 캐나다, 한국의 PRTR 조사기준을 비교한 결과는 표 1에 나타내었다. PRTR 조사기준으로는 화학물질 배출량 보고 단위, 교통수단이나 농업 등 비점오염원에 대한 포함여부, 사업장의 근로자 수, 화학물질 취급량 및 배출량으로 분류하였다. 사업장의 근로자 기준은 미국은 종일근로자가 10명, 일본은 정규직 21명, 우리나라는 불산사고 이후 1명 이상이면 조사대상이다. 또, 캐나다는 타 국가와 다르게 근로자 수가 아닌 근로시간이 연간 20,000시간을 기준으로 하고 있다. 보고단위와 화학물질 취급

Table 1. PRTR survey criteria of the member states of OECD (OECD, 2014).

Country	Reporting unit	Fugitive source	Employee thresholds	Activity thresholds
U.S.A TRI ¹⁾	Facility ³⁾	×	10 full-time equivalent employees	- Manufacture (0~25,000 lbs/yr) - Process (0~25,000 lbs/yr) - Otherwise use (0~10,000 lbs/yr)
Japan PRTR	Business	○	21 regular employees	- Annual amount handled (1 ton or 0.5 tons)
Canada NPRI ²⁾	Facility	○	Working time is 20,000 hour/year	- Manufacture, process, or otherwise use (5 to 10,000 kg/yr) - Release, disposal, or transfer for recycling (50 kg/yr) - Air releases (300 to 20,000 kg/yr)
Korea PRTR	Business	○	1 employee	- Annual amount handled (1 ton or 10 tons)

¹⁾Toxic Release Inventory; ²⁾National Pollutant Release Inventory; ³⁾include in metal mining, electric power generation, portable facility, pipeline installation, etc.

및 배출량 기준은 우리나라와 일본의 경우 사업장 단위로 화학물질량 연간 취급량을 기준으로 설정하고 있으며, 미국과 캐나다의 경우 사업장보다 제조, 광산업, 발전 등의 시설단위로 보고받고 있어서 화학물질 취급 및 배출량을 더 세분화하여 조사하고 있다. 비점 오염원은 미국을 제외한 나머지 국가들은 조사 대상으로 포함하고 있으며, 우리나라는 4년마다 조사하고 있다.

3. 연구 방법

3.1 화학물질 배출량 자료

화학물질 배출·이동량 자료는 국립환경과학원에서 취합하여 화학물질배출·이동량정보시스템 홈페이지에 게시하였으나 2017년 7월 이후부터는 화학물질안전원에서 취합 관리하고 있으며 데이터는 연도별, 지역별, 물질별, 업종별, 업체별로 검색이 가능하다(NICS, 2017). 본 연구에서는 2012년과 2013년 2년간의 자료를 이용하여 국내 각 지역의 대기로 배출되는 화학물질 종류, 배출 특성을 분석하였으며, 영남권에 대한 보다 세밀한 특성 분석은 2012년 자료에 국한하였다. 2012 및 2013년 화학물질 배출량 조사 대상은 2014년 이전이므로 근로자 30인 이상의 기준을 적

용받고 있다.

3.2 위해성을 고려한 배출량 산정 방법

본 연구에서는 PRTR 자료와 물질별 독성자료에 근거한 노출계수들을 하나의 수치로 계산하는 결정론적 접근방법을 응용하여 각 물질의 위해성(혹은 독성)을 가중치로 고려한 배출량을 산정하였다. 먼저 유해화학물질을 두 그룹(즉, 발암성과 비발암성)으로 구분하고, 편의상 발암성물질의 배출량은 위해가중배출량(risk-weighted emission), 비발암성물질의 배출량은 독성가중배출량(hazard-weighted emission)으로 표현하였다. 이렇게 산출된 결과는 기존의 위해성평가와는 절차와 방법에 있어 차이가 있으므로 절대적인 의미(혹은 물리적 의미)를 부여하기 보다는 각 화학물질의 중요성에 대한 상대적인 비교에 그 의미를 두어야 한다.

발암가능성 물질의 위해가중배출량은 식(1)과 같이 각 물질의 배출량에 물질별 단위위해도(unit risk, 이하 UR)를 곱하는 방식으로 산출하였으며, 비발암성물질에 대한 독성가중배출량은 식(2)와 같이 배출량 자료에 인체노출참고농도(reference concentration, 이하 RfC)를 나누는 방식으로 산출하였다. 여기서 UR 값이 커지면 위해도(발암가능성)는 증가하게 되며, RfC 값은 작을수록 노출로 인한 위해성이 크다는 것

을 의미한다.

$$\begin{aligned} \text{위해가중배출량(Risk-weighted Emission, m}^3\text{/yr)} \\ = \text{Emission (kg/yr)} \times \text{UR } (\mu\text{g/m}^3)^{-1} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{독성가중배출량(Hazard-weighted Emission, m}^3\text{/yr)} \\ = \text{Emission (kg/yr)/RfC } (\mu\text{g/m}^3) \end{aligned} \quad (2)$$

3.3 독성정보자료

표 2에는 본 연구에서 인용한 독성정보자료를 정리하였다. 독성정보는 국내 PRTR에서 조사되는 415종의 물질 중 공기호흡을 통한 만성노출 독성자료가 있는 물질들을 먼저 선정하고, 그 중에서도 영남권에서 실제 배출되는 물질들 위주로 자료를 선정하였다. UR과 RfC는 IRIS (USEPA, 2016b), California EPA (CalEPA, 2016), US Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR, 2016), USEPA Health Effects Assessment Tables (USEPA, 2016c) 등의 자료를 이용하였다. 독성자료의 인용에 있어서 IRIS자료를 우선하고, IRIS에서 정보가 없을 경우 ATSDR, California EPA, HEAST의 순으로 정보를 탐색하여 인용하였다.

이때, 호흡을 통한 최저노출한계가 ppm 단위로 제공된 경우 20°C 1기압 조건에서 질량농도 단위로 환산하였다. USEPA의 Provisional Peer Reviewed Toxicity Values (USEPA, 2016d)는 아직 확정된 값이 아니어서 본 연구에서는 사용하지 않았다. IARC와 IRIS의 발암 분류등급 (Weight of Evidence, 이하 WOE)은 표 3에 나타내었다(IARC, 2019; USEPA, 2019).

PRTR 자료 중 중금속은 납 및 그 화합물, 비소 및 그 화합물, 니켈 및 그 화합물 등으로 조사되고 있으나, 독성자료 검색에서는 각종 중금속화합물 중 대표되는 물질인 납, 비소, 니켈 등에 해당되는 발암등급과 독성자료를 사용하였다. 크롬은 3가와 6가로 분류되며, 3가의 경우 독성이 거의 없지만 6가의 경우는 매우 독성이 강한 물질로 알려져 있다. 그러나 국내 PRTR 조사에서는 6가 크롬의 배출량 자료가 없으므로 일단 3가 크롬의 독성자료를 적용하였다. 기존 연구에 의하면 국내 대기 중 6가 크롬 농도는 지역에 따라 편차는 있으나 전반적으로 볼 때 총 크롬 농도의 약 0.7~2.4% 수준으로 존재한다고 보고된 바 있다(Kang *et al.*, 2009).

Table 2. Toxicity data used in study.

Chemical	CAS number	Weight of evidence		Carcinogenic risk		Non-carcinogenic risk	
		IARC	USEPA	Unit risk ($\mu\text{g/m}^3$) ⁻¹	Reference	RfC (mg/m^3)	Reference
Formaldehyde	50-00-0	1	B1	1.30E-5	IRIS	9.83E-3	ATSDR
Carbon tetrachloride	56-23-5	2B	LH	6.00E-6	IRIS	1.00E-1	IRIS
Aniline	62-53-3	3	B2	1.60E-6	CalEPA	1.00E-3	IRIS
Methyl alcohol	67-56-1	-	-	-	-	2.00E+1	IRIS
Chloroform	67-66-3	2B	LH	2.30E-5	IRIS	9.77E-2	ATSDR
N,N-Dimethylformamide	68-12-2	2A	-	-	-	3.00E-2	IRIS
Benzene	71-43-2	1	CH	7.80E-6	IRIS	3.00E-2	IRIS
Methyl chloride	74-87-3	3	InI	1.80E-6	HEAST	9.00E-2	IRIS
Hydrogen cyanide	74-90-8	-	InI	-	-	8.00E-4	IRIS
Vinyl chloride	75-01-4	1	CH	8.80E-6	IRIS	1.00E-1	IRIS
Acetaldehyde	75-07-0	2B	B2	2.20E-6	IRIS	9.00E-3	IRIS
Dichloromethane	75-09-2	2A	LH	1.00E-8	IRIS	6.00E-1	IRIS
Ethylene oxide	75-21-8	1	B1	3.00E-3	IRIS	3.00E-2	CAL
Propylene oxide	75-56-9	2B	B2	3.70E-6	IRIS	3.00E-2	IRIS
Methyl ethyl ketone	78-93-3	-	InI	-	-	5.00E+0	IRIS
Trichloroethylene	79-01-6	1	CH	4.10E-6	IRIS	2.00E-3	IRIS
Acrylamide	79-06-1	2A	LH	1.00E-4	IRIS	6.00E-3	IRIS
Naphthalene	91-20-3	2B	C	3.40E-5	CalEPA	3.00E-3	IRIS

Table 2. Continued.

Chemical	CAS number	Weight of evidence		Carcinogenic risk		Non-carcinogenic risk	
		IARC	USEPA	Unit risk ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ⁻¹	Reference	RfC (mg/m^3)	Reference
2,4-Diaminotoluene	95-80-7	2B	-	1.10E-3	CalEPA	-	-
Ethylenethiourea	96-45-7	3	-	1.30E-5	CalEPA	-	-
Furfural	98-01-1	3	-	-	-	5.00E-2	HEAST
Ethylbenzene	100-41-4	2B	D	2.50E-6	CalEPA	1.00E+0	IRIS
Styrene	100-42-5	2B	-	-	-	1.00E+0	IRIS
Benzyl chloride	100-44-7	2A	B2	4.90E-5	CalEPA	-	-
3,3'-Dichloro-4,4'-diaminodiphenyl methane	101-14-4	1	B2	4.30E-4	CalEPA	-	-
Diphenylmethane-4,4'-diisocyanate	101-68-8	3	D	-	-	6.00E-4	IRIS
1,2-Epoxybutane	106-88-7	2B	-	-	-	2.00E-2	IRIS
Epichlorohydrin	106-89-8	2A	B2	1.20E-6	IRIS	1.00E-3	IRIS
1,3-Butadiene	106-99-0	1	CH	3.00E-5	IRIS	2.00E-3	IRIS
Allyl chloride	107-05-1	3	C	6.00E-6	CalEPA	1.00E-3	IRIS
1,2-Dichloroethane	107-06-2	2B	B2	2.60E-5	IRIS	2.40E+0	ATSDR
Acrylonitrile	107-13-1	2B	B1	6.80E-5	IRIS	2.00E-3	IRIS
Chloromethyl methylether	107-30-2	-	A	6.90E-4	CalEPA	-	-
Vinyl acetate	108-05-4	2B	-	-	-	2.00E-1	IRIS
Toluene	108-88-3	3	Inl	-	-	5.00E+0	IRIS
Phenol	108-95-2	3	Inl	-	-	2.00E-1	CalEPA
2-Methoxyethanol	109-86-4	-	-	-	-	2.00E-2	IRIS
n-Hexane	110-54-3	-	Inl	-	-	7.00E-1	IRIS
2-Ethoxyethanol	110-80-5	-	-	-	-	2.00E-1	IRIS
Cyclohexane	110-82-7	-	Inl	-	-	6.00E+0	IRIS
Propylene	115-07-1	3	-	-	-	3.00E+0	CalEPA
Di(2-ethylhexyl)phthalate	117-81-7	2B	B2	2.40E-6	CalEPA	-	-
Chloroprene	126-99-8	2B	LH	3.00E-4	IRIS	2.00E-2	IRIS
Tetrachloroethylene	127-18-4	2A	LH	2.60E-7	IRIS	4.00E-2	IRIS
Hexamethylene diisocyanate	822-06-0	-	-	-	-	1.00E-5	IRIS
1,3-Propane sultone	1120-71-4	2A	-	6.90E-4	CalEPA	-	-
<i>m,p,o</i> -Cresol	1319-77-3	-	C	-	-	6.00E-1	CalEPA
<i>m,p,o</i> -Xylenes	1330-20-7	3	Inl	-	-	1.00E-1	IRIS
Methyl tert-butyl ether	1634-04-4	3	-	2.60E-7	CalEPA	3.00E+0	IRIS
Chlorothalonil	1897-45-6	2B	-	8.90E-7	CalEPA	-	-
Lead	7439-92-1	2B	B2	1.20E-5	CalEPA	1.50E-4	IRIS
Barium	7440-39-3	-	D	-	-	5.00E-4	HEAST
Boron	7440-42-8	-	-	-	-	2.00E-2	HEAST
Manganese	7439-96-5	-	D	-	-	5.00E-5	IRIS
Vanadium	7440-62-2	-	-	-	-	1.00E-4	ATSDR
Mercury	7439-97-6	3	D	-	-	3.00E-4	IRIS
Nickel	7440-02-0	2B	A	2.40E-4	IRIS	9.00E-5	ATSDR
Arsenic	7440-38-2	1	A	4.30E-3	IRIS	1.50E-5	CalEPA
Trifluoroborane	7637-07-2	-	-	-	-	7.00E-4	HEAST
Hydrogen chloride	7647-01-0	3	-	-	-	2.00E-2	IRIS
Hydrogen fluoride	7664-39-3	-	-	-	-	1.40E-2	CalEPA
Ammonia	7664-41-7	-	-	-	-	1.00E-1	IRIS
Sulfuric acid	7664-93-9	-	-	-	-	1.00E-3	CalEPA
Chlorine	7782-50-5	-	-	-	-	1.45E-4	ATSDR
Hydrogen sulfide	7783-06-4	-	Inl	-	-	2.00E-3	IRIS
Chromium (+3)	16065-83-1	3	Inl	-	-	-	-
Toluene diisocyanate and its isomers mixture	26471-62-5	2B	-	1.10E-5	CalEPA	7.00E-5	IRIS

¹⁾IRIS: Integrated Risk Information System; ²⁾ATSDR: US Agency for Toxic Substances and Disease Registry; ³⁾CalEPA: California Environmental Protection Agency; ⁴⁾HEAST: USEPA Health Effects Assessment Tables

Table 3. Weight-of-evidence (WOE) for potential carcinogens by IARC (2019) and USEPA (2019).

Classification	WOE	Category
IARC	1	Carcinogenic to humans
	2A	Probably carcinogenic to humans
	2B	Possibly carcinogenic to humans
	3	Not classifiable as to its carcinogenicity to humans
	4	Probably not carcinogenic to humans
U.S. EPA (2005 guideline)	CH	Carcinogenic to humans
	LH	Likely to be carcinogenic
	SE	Suggestive evidence of carcinogenic potential
	InI	Inadequate information to assess carcinogenic potential
	NH	Not likely to be carcinogenic
U.S. EPA (1986 guideline)	A	Human carcinogen
	B1	Probable carcinogen, limited human evidence
	B2	Probable carcinogen, sufficient evidence in animals
	C	Possible human carcinogen
	D	Not classifiable
	E	Evidence of non-carcinogenicity

Table 4. Total emissions of chemicals into the atmosphere of the 5 regions in Korea.

Region	2012 year (kg/yr)	2013 year (kg/yr)	Increase (kg/yr)
Seoul metropolitan	9,701,268 (19.0%)	11,100,585 (22.0%)	1,399,318
Yeongnam	25,459,021 (50.0%)	24,481,447 (48.4%)	-377,575
Honam	7,106,492 (14.0%)	7,748,118 (15.3%)	641,626
Chungcheong	8,216,852 (16.1%)	6,760,314 (13.4%)	-1,456,537
Gangwon	453,791 (0.9%)	453,208 (0.9%)	-583
Total	50,937,424 (100.0%)	50,543,673 (100.0%)	-393,752

4. 결과 및 고찰

4.1 전국 및 권역별 화학물질 배출량 비교

2012년과 2013년의 화학물질배출량 자료 중 대기 로 배출되는 양을 조사하여 우리나라를 5개 권역(수도권, 영남권, 호남권, 충청권, 강원권)으로 분류하여 집계하였다. 수도권은 서울, 인천, 경기도를 포함하며, 영남권은 대구, 부산, 울산, 경상북도, 경상남도가 포함된다. 충청권은 대전, 세종, 충청남도, 충청북도가 포함되고 호남권은 광주, 전라남도, 전라북도, 제주도가 포함된다. 또, 강원권은 강원도만으로 집계하였다. 5개 권역별로 화학물질 총 배출량을 조사하고, 그 자료를 다시 발암성과 비발암성 그룹으로 나누어 정리하였다.

권역별 2012년과 2013년의 화학물질 총 배출량 자

료는 표 4에 나타내었다. 2013년의 배출량 순위는 영남권, 수도권, 충청권, 호남권, 강원권 순으로 나타났으며, 2012년은 영남권, 충청권, 수도권, 호남권, 강원권으로 나타났다. 영남권의 배출량은 전국 배출량의 약 50%를 차지하였으며 수도권, 호남권, 충청권에 비해 약 3배가량 많이 배출하였다. 강원권과는 무려 55배 정도 차이가 나는 것으로 나타났다. 2012년과 2013년의 화학물질 배출량을 비교해 보면 영남권과 충청권은 2012년보다 2013년의 화학물질 배출량이 감소한 것을 확인할 수 있으며, 충청권의 경우 1,456 ton/년이 감소하였다. 수도권과 호남권은 2012년보다 2013년의 화학물질 배출량이 증가한 것으로 나타났으며, 수도권은 1,399 ton/년이 증가하였다. 강원권은 2012년과 2013년 화학물질 배출량이 비슷한 것으로 나타났다. 충청권의 배출량 감소의 주된 이유는 dichloro-

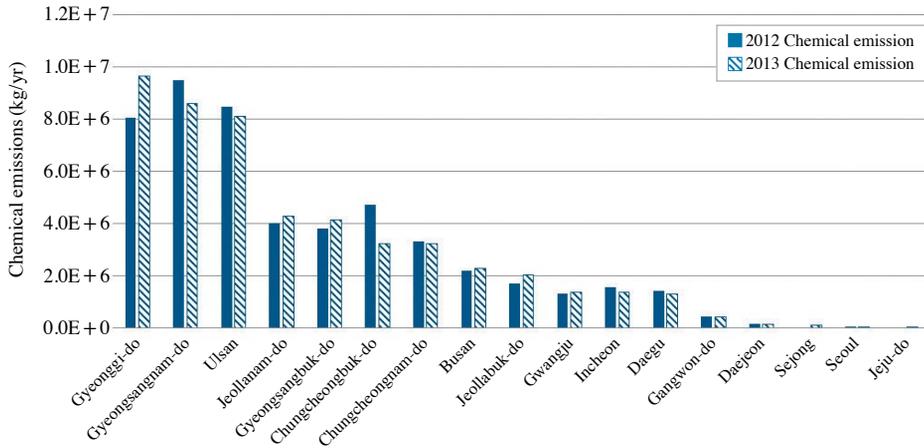


Fig. 1. Total air emissions of chemicals in the 8 cities and 9 provinces in Korea.

Table 5. Emissions of potential carcinogens into the atmosphere of the 5 regions in Korea.

Region	2012 year (kg/yr)	2013 year (kg/yr)	Increase (kg/yr)
Seoul metropolitan	489,921 (6.5%)	494,984 (7.4%)	5,063
Yeongnam	2,911,481 (38.8%)	3,430,827 (51.1%)	519,345
Honam	1,494,888 (19.9%)	1,266,986 (18.9%)	-227,902
Chungcheong	2,606,745 (34.7%)	1,503,490 (22.4%)	-1,103,256
Gangwon	9,542 (0.1%)	16,342 (0.2%)	6,801
Total	7,512,578	6,712,629	799,949

methane이 전년도에 비해 1,025 ton/년 감소한 것이 가장 큰 영향을 미친 것으로 보인다.

2012년과 2013년의 화학물질 대기 배출량을 광역 지자체별로 분류하여 비교한 결과는 그림 1에 나타내었다. 2012년에는 16개, 2013년에는 세종시가 추가되어 17개 지자체로 분류하였다. 2012년에는 경상남도, 울산, 경기도, 충청북도, 전라남도, 경상북도 순으로 높았으며, 2013년에는 경기도, 경상남도, 울산, 전라남도, 경상북도 순으로 높게 나타났다. 경상남도와 울산, 충청북도 외 6개의 지자체는 2012년에 비해 2013년에 배출량이 감소하였으며, 경기도, 경상북도, 전라남도, 전라북도 등의 지자체에서는 배출량이 증가하였다. 경기도의 화학물질 배출량은 1,600 ton/년이 증가하였으며, 경상남도는 902 ton/년, 울산은 365 ton/년, 충청북도는 1,462 ton/년이 감소하였다.

표 5에는 권역별 발암가능성 물질 배출량을 나타내

었으며, 영남권, 충청권, 호남권, 수도권, 강원권 순으로 높게 나타났다. 2012년에는 영남권은 전국 배출량의 38.8%, 충청권은 34.4%, 호남권 19.9%, 수도권 6.5%가 차지하였으며, 2013년에는 영남권이 51.1%, 충청권 22.4%, 호남권 18.9%, 수도권 7.4% 차지하였다. 2012년에 비해 2013년의 영남권 발암성물질은 519 ton/년이 증가하였으나 충청권은 dichloromethane의 영향으로 1,103 ton/년 감소하였다. 전체적으로 발암가능성 물질은 2012년에 비해 2013년에 약간 증가한 추세를 보였다. 총 화학물질 배출량 중 발암가능성 물질이 차지하는 비율은 2012년의 경우 충청권이 32%, 호남권이 21%, 영남권이 11%, 수도권 5%, 강원권 2%로 나타났으며, 2013년의 경우 충청권이 22%, 호남권이 16%, 영남권 14%, 수도권과 강원권이 4%로 조사되었다.

권역별 비발암성 물질의 배출량 자료는 표 6에 나

Table 6. Emissions of non-carcinogens into the atmosphere of the 5 regions in Korea.

Region	2012 year (kg/yr)	2013 year (kg/yr)	Increase (kg/yr)
Seoul metropolitan	6,709,645 (16.2%)	7,973,251 (19.7%)	1,263,605
Yeongnam	22,815,098 (55.1%)	21,981,692 (54.2%)	-833,406
Honam	6,004,560 (14.5%)	6,293,200 (15.5%)	288,641
Chungcheong	5,620,082 (13.6%)	4,031,661 (9.9%)	-1,588,421
Gangwon	233,755 (0.6%)	16,342 (0.6%)	7,103
Total	41,383,140	40,520,661	-862,479

Table 7. Top 50 chemicals of the emission amount in Yeongnam region.

Rank	Chemical	Emission (kg/yr)	Rank	Chemical	Emission (kg/yr)
1	<i>m,p,o</i> -Xylenes	13,146,428	26	Hydrogen peroxide	58,096
2	Toluene	2,509,905	27	Butane	56,755
3	Ethylbenzene	1,642,881	28	Naphtha	51,786
4	Methyl alcohol	1,606,272	29	Zinc	50,359
5	<i>N,N</i> -Dimethylformamide	856,708	30	Tetrachloroethylene	50,131
6	2-Propanol	848,315	31	Hydrogen fluoride	49,087
7	Methyl ethyl ketone	796,325	32	Manganese	40,045
8	Dichloromethane	707,652	33	Acrylonitrile	38,763
9	Ethyl acetate	372,629	34	Chloroform	38,735
10	Trichloroethylene	194,023	35	2-Ethoxyethyl acetate	38,567
11	Ethylene	190,487	36	Phenol	37,260
12	Ammonia	174,360	37	Sulfuric acid	33,930
13	Sulfur hexafluoride	165,824	38	Cyclohexane	33,849
14	Mb polymer*	161,751	39	Copper	31,509
15	Hydrogen chloride	158,388	40	Propylene oxide	29,333
16	Aluminium	132,357	41	1-Butene	23,933
17	Acetic acid	123,757	42	Methyl chloride	22,706
18	Barium	109,419	43	Vinyl chloride	22,645
19	2-Furanmethanol	105,992	44	Methyl tert-butyl ether	22,145
20	Vinyl acetate	77,603	45	Hydrogen sulfide	22,138
21	n-Hexane	77,522	46	<i>m,p,o</i> -Cresols	21,922
22	Propylene	77,327	47	Sulfur	19,395
23	Nitric acid	73,050	48	Perfluorocarbons	18,934
24	Benzene	69,225	49	Sodium hydroxide	15,085
25	Styrene	67,540	50	Lead	12,194

*4,4'-(1-Methylethylidene) bisphenol polymer

타내었다. 2012년과 2013년 모두 영남권, 수도권, 호남권, 충청권, 강원권 순으로 높게 나타났다. 2012년에는 영남권은 54.2%, 수도권 19.7%, 호남권 15.5%, 충청권 9.9%, 강원권 0.6%를 차지하였고, 2013년에는 영남권이 55.1%, 수도권 16.2%, 호남권 14.5%, 충청권 13.6%, 강원권 0.6%를 차지하였다. 영남권, 충청권은 2012년에 비해 2013년 비발암성 물질 배출량이 감소하였으며, 서울권과 호남권, 강원권은 배출량이 증가하였다. 충청권의 경우 1,588 ton/년의 비발암성 물질

배출량이 감소하였는데 이 역시 dichloromethane의 배출량 감소가 주된 원인이었다. 화학물질 배출량 중 비발암성 물질의 비율은 2012년의 경우 영남권 90%, 호남권 84%, 수도권 69%, 충청권 68%, 강원권 52%에 해당되고 2013년의 경우도 2012년과 유사하였다.

4.2 영남권의 화학물질 배출량 순위

화학물질안전원에서 발표하는 '화학물질 배출량조사보고서'에서는 전국 배출량 순위만 수록하고 있다.

본 연구에서는 2012년의 권역별 화학물질 배출량에서 가장 많은 배출량을 기록한 영남권 자료를 분석하여 그 배출특성을 분석하였다(MOE, 2014). 영남권에서는 전체 415종의 물질 중 약 40%인 165종이 보고된 것으로 나타났으며 그 중 상위 50개 화학물질의 배출량과 순위는 표 7에 나타내었다. 영남권에서 배출량이 많은 물질들은 xylenes, toluene, ethylbenzene, methanol, N,N-dimethylformamide의 순으로 나타났다. 이

와 같이 배출량이 많은 물질은 대부분 유기용매로 사용되는 물질이었으며 xylenes은 toluene의 비해 약 6배 정도 더 많이 배출되었다. 유기용매는 다양한 산업에서 사용되지만 대표적으로 조선 산업에서 많이 사용되는 물질 중의 하나이다.

영남권에서 배출되는 총 165종의 화학물질 중에서 단위위해도가 존재하는 발암가능성 물질은 모두 36종이었다. 한편, 비발암성 물질은 모두 58종으로 나타

Table 8. Ranking of the air emissions of carcinogenic chemicals.

Potential carcinogenic chemicals					Non-carcinogenic chemicals				
Chemical	Risk-weighted emission		Mass emission		Chemical	Hazard-weighted emission		Mass emission	
	m ³ /year	Rank	kg/year	Rank		m ³ /year	Rank	kg/year	Rank
Ethylbenzene	4.11E+9	1	1,642,881	3	Manganese	8.01E+14	1	40,045	32
Acrylonitrile	2.64E+9	2	38,763	33	Barium	2.19E+14	2	109,419	18
Nickel	1.02E+9	3	4,242	67	Xylenes	1.31E+14	3	13,146,428	1
Chloroform	8.91E+8	4	38,735	34	Trichloroethylene	9.70E+13	4	194,023	10
Trichloroethylene	7.95E+8	5	194,023	10	Lead	8.13E+13	5	12,194	50
Benzene	5.40E+8	6	69,225	24	Chlorine	6.72E+13	6	9,738	52
CME ¹⁾	5.17E+8	7	749	91	Nickel	4.71E+13	7	4,242	67
2,4-Diaminotoluene	3.93E+8	8	358	99	Sulfuric acid	3.39E+13	8	33,930	37
1,3-Butadiene	3.47E+8	9	11,560	51	N,N-Dimethylformamide	2.86E+13	9	856,708	5
Acrylamide	2.70E+8	10	2,698	71	HMD ³⁾	1.94E+13	10	194	106
Vinyl chloride	1.99E+8	11	22,645	43	Acrylonitrile	1.94E+13	11	38,763	33
1,2-Dichloroethane	1.92E+8	12	7,399	58	Toluene diisocyanates	1.48E+13	12	1,039	86
Ethylene oxide	1.84E+8	13	2,097	74	Hydrogen sulfide	1.11E+13	13	22,138	45
Lead	1.46E+8	14	12,194	50	Hydrogen chloride	7.92E+12	14	158,388	15
Cadmium	1.31E+8	15	73	117	Cadmium	7.27E+12	15	73	117
Propylene oxide	1.09E+8	16	29,333	40	D4,4d ⁴⁾	5.86E+12	16	3,517	68
Arsenic	1.01E+8	17	23	131	1,3-Butadiene	5.78E+12	17	11,560	51
Formaldehyde	9.54E+7	18	7,337	59	Epichlorohydrin	4.39E+12	18	4,390	65
Carbon tetrachloride	5.02E+7	19	8,361	55	Hydrogen cyanide	4.23E+12	19	3,386	69
Methyl chloride	4.09E+7	20	22,706	42	Hydrogen fluoride	3.51E+12	20	49,087	31
1,3-Propane sultone	3.65E+7	21	53	121	Benzene	2.31E+12	21	69,225	24
3Di4dm ²⁾	2.39E+7	22	56	120	Ammonia	1.74E+12	22	174,360	12
Di(2-ethylhexyl)phthalate	2.00E+7	23	8,337	56	Ethylbenzene	1.64E+12	23	1,642,881	3
Tetrachloroethylene	1.30E+7	24	50,131	30	Arsenic	1.56E+12	24	23	131
Toluene diisocyanates	1.14E+7	25	1,039	86	Tetrachloroethylene	1.25E+12	25	50,131	30
Ethylenethiourea	9.45E+6	26	727	92	Allyl chloride	1.25E+12	26	1,248	84
Allyl chloride	7.49E+6	27	1,248	84	Dichloromethane	1.18E+12	27	707,652	8
Naphthalene	7.19E+6	28	212	105	Propylene oxide	9.78E+11	28	29,333	40
Dichloromethane	7.08E+6	29	707,652	8	Formaldehyde	7.46E+11	29	7,337	59
Methyl tert-butyl ether	5.76E+6	30	22,145	44	Vanadium	6.51E+11	30	65	118
Epichlorohydrin	5.27E+6	31	4,390	65	Toluene	5.02E+11	31	2,509,905	2
Chloroprene	5.22E+6	32	17	134	Acrylamide	4.50E+11	32	2,698	71
Acetaldehyde	7.04E+4	33	32	127	Chloroform	3.96E+11	33	38,735	34
Aniline	6.18E+4	34	39	125	Vinyl acetate	3.88E+11	34	77,603	20
Benzyl chloride	4.90E+4	35	1	157	2-Methoxyethanol	3.49E+11	35	6,982	61

¹⁾Chloromethyl methyl ether; ²⁾3,3'-Dichloro-4,4'-diaminodiphenyl methane; ³⁾Hexamethylene diisocyanate; ⁴⁾Diphenylmethane-4,4'-diisocyanate

났다. 이들 자료에 대하여 발암가능성물질에 대한 위해가중배출량과 비발암성물질에 대한 독성가중배출량을 산출한 결과를 토대로 각 그룹의 상위 35종의 물질에 대한 순위를 표 8에 나타내었다. 영남권의 위해가중배출량은 ethylbenzene, acrylonitrile, Ni, chloroform, trichloroethylene (TCE), benzene 등의 순으로 나타났다. Ethylbenzene과 acrylonitrile, Ni, chloroform 등은 IARC에서 발암 2B등급으로 분류되어 있으며 TCE와 benzene은 1등급 발암성물질로 분류되어 있다. Ethylbenzene은 대기배출량 순위 3위였고 위해가중배출량 순위는 1위로 나타났으며, acrylonitrile과 Ni, chloroform은 위해가중배출량 순위에서는 상위권으로 나타났지만 대기배출량 순위가 33위, 67위, 34위로 큰 차이가 있었다. TCE는 위해가중배출량은 5위, 대기배출량은 10위로 나타났으며, benzene은 위해가중배출량은 6위로 나타났지만 대기배출량은 24위로 나타났다. Ethylbenzene은 다른 발암성물질보다 비교적 독성이 강한 편은 아니지만 대기배출량이 월등히 많은 이유에서 상위권으로 나타난 것으로 보인다.

표 8에 나타난 비발암성물질에 대한 독성가중배출량 순위에서 상위권에 속한 물질들은 Mn, Ba, xylenes, TCE, Pb 등의 순으로 나타났다. Mn의 경우 대기배출량 순위는 32위였으나 독성가중배출량 순위는 1위로 나타났으며, Ba의 경우 독성가중배출량은 2위지만 대

기배출량은 18위로 나타났다. Xylenes은 대기배출량 순위에서는 영남권에서 가장 많은 1순위였지만 환경위해배출량 순위는 3위로 나타났다. 위해가중배출량에서도 상위권에 위치했던 TCE는 대기배출량은 10위였으나 독성가중배출량은 4위로 나타났다. TCE, Ni, Mn, acrylonitrile 등은 대기배출량은 적은 것으로 조사되었지만 위해성과 독성을 고려할 때 그 순위가 매우 높게 나타나 상대적으로 중요한 물질들이라 할 수 있다. 따라서 단순히 배출량에만 근거하여 우선관리물질을 선정하는 것은 비효율적이라고 판단된다.

4.3 영남권의 산업단지 화학물질 배출량

영남권에는 전국 5대 권역 중에서 가장 많은 국가산업단지가 위치하고 있다. 부산광역시에는 명지·녹산국가산단에 기계 및 제조업, 운송, 석유화학 등의 업체가 많이 입주해 있으며, 그 외에도 사하구와 사상구에 대규모 일반공업단지가 있다. 울산의 경우 미포, 온산 국가산단 및 석유화학단지 등이 위치해 있다. 미포국가산단의 경우 조선산업과 자동차, 석유 화학 산업이 주종이며, 온산국가산단에는 기계 및 제조, 목재, 운송 등의 산업체가 많이 있다. 경남은 창원국가산단과 거제도에 대규모 조선소가 있으며, 창원국가산단은 기계 및 제조가 주요산업이다. 대구의 경우 국가산단은 아니지만 성서산업단지가 있으며, 기계 및 제조

Table 9. Potential carcinogenic emissions of major industrial complexes in Yeongnam region.

Rank	Industrial area	Total chemical emission (kg/yr)	Potential carcinogenic chemical emission (kg/yr)	Risk-weighted emission (m ³ /yr)
1	Mipo national industrial complex (Ulsan)	7.25E+6	8.18E+5	5.40E+9
2	Onsan national industrial complex (Ulsan)	9.61E+5	1.62E+5	1.86E+9
3	Okpo national industrial complex (Gyeongsangnam-do)	2.36E+6	4.07E+5	1.02E+9
4	Dyeing industrial complex (Daegu)	3.84E+5	3.54E+4	6.97E+8
5	Changwon national industrial complex (Gyeongsangnam-do)	7.57E+5	5.09E+4	5.46E+8
6	Jukdo national industrial complex (Gyeongsangnam-do)	2.02E+6	1.32E+5	3.29E+8
7	Dalseong 1st general industrial complex (Daegu)	2.44E+5	7.11E+4	2.78E+8
8	Haman-Chiruso industrial complex (Gyeongsangnam-do)	4.11E+4	3.34E+3	2.75E+8
9	Seongseo general industrial complex (Daegu)	5.91E+5	1.00E+4	1.90E+8
10	Gumi national industrial complex (Gyeongsangbuk-do)	7.91E+5	3.22E+5	1.45E+8
11	Myeongji-Noksan national industrial complex (Busan)	1.03E+6	1.82E+4	1.32E+8
12	Pohang national industrial complex (Gyeongsangbuk-do)	7.63E+4	3.38E+2	4.82E+7
13	Saha general industrial areas (Busan)	4.78E+5	1.19E+4	3.53E+7
14	Shinpyeong-Jangnim general industrial complex (Busan)	2.62E+5	2.26E+4	3.05E+7
15	Pohang steel industrial complex (Gyeongsangbuk-do)	4.01E+5	9.62E+2	2.15E+7

Table 10. Non-carcinogenic emissions of major industrial complexes in Yeongnam region.

Rank	Industrial area	Total chemical emission (kg/yr)	Non-carcinogenic chemical emission (kg/yr)	Hazard-weighted emission (m ³ /yr)
1	Changwon national industrial complex (Gyeongsangnam-do)	4.88E + 14	6.26E + 5	7.57E + 5
2	Pohang steel industrial complex (Gyeongsangbuk-do)	2.55E + 14	2.90E + 5	4.01E + 5
3	Mipo national industrial complex (Ulsan)	1.44E + 14	6.50E + 6	7.25E + 6
4	Onsan national industrial complex (Ulsan)	1.02E + 14	8.17E + 5	9.61E + 5
5	Saha general industrial areas (Busan)	4.37E + 13	4.29E + 5	4.78E + 5
6	Myeongji-Noksan national industrial complex (Busan)	3.09E + 13	1.02E + 6	1.03E + 6
7	Haman-Chiruso industrial complex (Gyeongsangnam-do)	2.49E + 13	2.75E + 4	4.11E + 4
8	Gumi national industrial complex (Gyeongsangbuk-do)	2.25E + 13	5.65E + 5	7.91E + 5
9	Dalseong 1st general industrial complex (Daegu)	2.22E + 13	2.37E + 5	2.44E + 5
10	Okpo national industrial complex (Gyeongsangnam-do)	1.92E + 13	1.96E + 6	2.36E + 6
11	Jukdo national industrial complex (Gyeongsangnam-do)	1.83E + 13	1.96E + 6	2.02E + 6
12	Pohang national industrial complex (Gyeongsangbuk-do)	8.70E + 12	2.94E + 4	7.63E + 4
13	Shinpyeong-Jangnim general industrial complex (Busan)	6.88E + 12	2.29E + 5	2.62E + 5
14	Seongseo general industrial complex (Daegu)	5.19E + 12	5.19E + 5	5.91E + 5
15	Dyeing industrial complex (Daegu)	2.32E + 12	3.76E + 5	3.84E + 5

업이 주된 산업이다. 경상북도에는 구미 및 포항에 대규모 국가산단이 위치하고 있는데 구미의 경우 제조업과 전자기기, 포항은 철강산업이 주요산업이다.

본 연구에서는 영남권에 위치한 총 76개의 산업단지 및 비산업단지 중에서 화학물질 배출량이 많은 15개의 대규모 배출지역에 대하여 조사하였으며 그 결과를 표 9 (발암가능성물질)와 표 10 (비발암성물질)에 수록하였다. 여기서 비산단의 경우에는 PRTR 조사대상물질을 배출하지만 산단지역 안에 위치하지 않는 사업장들을 말한다.

표 9에 나타난 위해가중배출량을 비교하면 울산 미포와 온산국가산단, 경남 옥포국가산단 등의 순으로 높게 나타났다. 구미국가산단의 경우에는 특이하게도 발암가능성 물질의 대기배출량은 영남권에서 3번째로 많았지만 위해가중배출량의 측면에서는 순위가 11위로 낮게 나타났다. 반면, 포항의 국가산단과 철강일반산단, 그리고 경남의 함안·칠서일반산단의 발암가능성 물질 배출량은 다른 산단에 비해 적었으나 위해성을 고려한 배출량은 다른 산단과 큰 차이가 나지 않는 것으로 조사되었다. 표 10에 나타난 비발암성물질에 대한 독성가중배출량을 비교하면 창원국가산단, 경남의 비산단지역, 포항의 철강일반산단 등의 순으로 높게 나타났다. 비발암성 물질의 배출총량은 적지

만 독성을 고려한 배출량이 높은 산단은 함안·칠서일반산단과 포항국가산단으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 2012년과 2013년 PRTR 자료를 대상으로 전국 5대 권역의 대기로 배출되는 화학물질의 특성을 파악하고, 그 중에서 전국 배출량의 약 50%를 차지하는 영남권 지역의 배출특성을 집중분석하였다. 전체 화학물질 배출량뿐만 아니라 발암가능성 및 비발암성 물질도 영남권이 다른 권역에 비해 많은 배출량을 나타내었다. 2012년과 2013년의 각 시·도별 비교에서 화학물질과 비발암성 물질은 경남, 울산, 경기도에서 많이 배출되었으며, 발암가능성 물질은 울산, 경남, 충북에서 많은 것으로 나타났다. 영남권에서는 미포, 온산, 창원국가산단과 석유화학단지, 조선산업단지 등의 배출량이 큰 영향을 미친 것으로 조사되었다.

PRTR 조사대상 415종 화학물질 중에서 영남권에서 배출되는 물질은 총 165종으로 나타났으며 xylenes, toluene, ethylbenzene 등과 같이 주로 유기용매로 사용되는 물질의 배출량이 많은 것으로 나타났다. 영남

권에서 배출되는 발암가능성 물질은 총 36종으로서 ethylbenzene, acrylonitrile, Ni 등이 높은 순위를 차지했다. 비발암성 물질은 총 58종으로 나타났으며, Mn, Ba, xylenes 등이 높은 순위를 차지하였다. 영남권에서 배출되는 유해물질을 산업단지별로 분석한 결과, 발암가능성 물질은 울산의 미포와 온산국가산단, 경남의 옥포국가산단 등이 많이 배출하는 것으로 나타났으며, 비발암성 물질은 경남의 창원국가산단과 비산단지역, 그리고 포항의 철강일반산단 등에서 많이 배출되는 것으로 나타났다. 그러나 본 연구에서는 이들 배출량 자료에 발암가능성 물질에 단위위해도를, 비발암성물질에는 인체노출한계농도를 각각의 가중치로 적용한 경우 단순 배출총량의 순위와는 매우 다른 양상으로 그 순위가 변하게 된다는 것을 입증하였다. 따라서 향후 지역별 우선관리대상물질을 선정할 경우 단순히 배출량에만 근거하는 것은 비효율적일 것이므로 배출량에 독성정보를 고려하여 중점관리물질을 선정하여야 할 것으로 판단된다. 이를 위한 하나의 방법으로 본 연구에서 예시한 바와 같이 각 물질별 독성자료를 배출량에 가중치로 적용하여 추산할 경우 큰 비용을 들이지 않고도 핵심적인 정보를 파악할 수 있다고 사료된다.

국내 PRTR 조사는 유용한 정보를 제공해 주는 것은 의심의 여지가 없지만 아직도 개선할 여지는 많이 있다. 특히 연료의 연소과정에서 부산물(예를 들면, PAHs)로 배출되거나 원료로 사용하지는 않았지만 공정상에서 다른 물질로 변환되어 배출될 수 있는 물질(예를 들면, acetaldehyde)와 같은 물질들은 사가지대에 놓여 있다. 또한, 소규모 업체가 누락되어 있다는 점과, 사업장 스스로 배출량을 파악하여 보고하는 시스템이므로 자료의 정확성에 대한 검증 등은 향후의 개선과제로 남아 있다. 이를 보완하기 위해서는 결국 주요 산단에서 유해화학물질 측정을 주기적으로 하여 실제 대기 중에서 어떤 물질들이 출현하고 있는가를 파악할 필요가 있다. 매년 발간되는 PRTR 보고서에는 발암성물질에 대한 평가는 전국을 대상으로 발표하고 있다. 하지만 지역별로 발달한 산업이 다르고

배출되는 화학물질도 다른 양상을 보이고 있어 지역별로 배출되는 발암가능성 물질의 현황도 보다 상세하게 보고되어야 한다.

감사의 글

본 연구의 일부는 환경부 지정 울산·부산·경남녹색환경지원센터의 공동지원으로 수행된 2015년도 연구개발사업(15-07/02/17-01-01-15)의 일환으로 수행되었습니다.

References

- Agency fo Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) (2016) Toxicological Profiles, <https://www.atsdr.cdc.gov/substances/indexAZ.asp> (accessed on Aug. 15, 2016).
- California Environmental Protection Agency (CalEPA) (2016) OEHHA Air Chemical Database, <https://oehha.ca.gov/air/chemicals> (accessed on Aug. 15, 2016).
- International Agency for Research on Cancer (IARC) (2019) List of Classifications, Volumes 1-123, <https://monographs.iarc.fr/list-of-classifications-volumes/> (accessed on Jan. 15, 2019).
- Japan Ministry of Environment (JMOE) (2016) PRTR Information Plaza Japan, <https://www.env.go.jp/chemi/prtr/notification/target.html> (accessed on Aug. 11, 2016).
- Kang, B.W., Han, J.S., Lee, M.D., Lee, H.S., Kim, J.H., Son, E.S., Baek, S.O. (2009) Concentration characteristics of airborne hexavalent chromium in the industrial area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 25(3), 179-187. (in Korean with English Abstract)
- Kim, J.Y. (2017) Emission Characteristics of Airborne Toxic Chemicals in Yeungnam Region, M.Sc Thesis, Graduate School of Yeungnam University, 94 p.
- Korean Industrial Complex Cooperation (KICC) (2017) A Statistics of Korean Industrial Complexes for 15 years (2001-10216), 102 p.
- Ministry of Environment (MOE) (2013) 2013 Environmental Statistics Yearbook, 732 p.
- Ministry of Environment (MOE) (2014) 2012 Report of PRTR Survey, 52 p.
- Ministry of Environment (MOE) (2015) 2015 White Paper of Envi-

- ronment, 609 p.
- Ministry of Environment (MOE) (2016a) 2016 White Paper of Environment, 591 p.
- Ministry of Environment (MOE) (2016b) 2014 Report of PRTR Survey, 40 p.
- Ministry of Environment (MOE) (2016c) Guidance Book of PRTR Survey, 451 p.
- National Institute of Chemical Safety (NICS) (2017) Pollutant Release and Transfer Registers System, <http://icis.me.go.kr> (accessed on Oct. 20, 2017).
- National Pollutants Release Inventory (NPRI) (2016) National Pollutants Release Inventory Program in Canada, <https://www.ec.gc.ca/inrp-npri> (accessed on August 11, 2016).
- Organization for Economic Cooperation and Development (OECD) (2014) Guidance Document on Elements of a PRTR: part 1, 126 p.
- Pollutant Release and Transfer Register (PRTR) (2016) Pollutant Release and Transfer Register System, <http://ncis.nier.go.kr/tri/> (accessed on Aug. 9, 2016).
- Shin, M.H. (2016) Characterization of Industrial Emissions of Toxic Chemicals into the Atmosphere of Daegu-Gyungbuk Region, M.Sc Thesis, Graduate School of Environmental Studies, Yeungnam University, 58 p.
- Statistics Korea (2012) Chemical Emission Survey, 2012 Regular Diagnosis of Statistical Data Quality, 84 p.
- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) (2016a) Toxics Release Inventory (TRI) Program, <https://www.epa.gov/toxics-release-inventory-tri-program> (accessed on Aug. 11, 2016).
- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) (2016b) Integrated Risk Information System, <https://www.epa.gov/iris> (accessed on Aug. 15, 2016).
- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) (2016c) Health Effects Assessment Summary Tables (FY 1997 update), <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/200000GZ.PDF?Dockkey=200000GZ.PDF> (accessed on Aug. 15, 2016).
- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) (2016d) Provisional Peer-reviewed Toxicity Values (PPRTVs) Assessments, <https://www.epa.gov/pprtv/provisional-peer-reviewed-toxicity-values-pprtvs-assessments> (accessed on Aug. 15, 2016).
- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) (2019) Dose response Assessment Tables, <https://www.epa.gov/fera/dose-response-assessment-tables> (accessed on Jan. 15, 2019).

Authors Information

김준영 (영남대학교 환경공학과 석사졸업)
백성옥 (영남대학교 환경공학과 교수)