

대구지역 공단과 인근 주거지역의 휘발성유기화합물질 오염도 평가

조 완 근 · 이 진 우*
경북대학교 환경공학과 · 계명대학교 낙동강환경연구원
(2003년 11월 10일 접수; 2004년 5월 13일 채택)

Evaluation of Volatile Organic Compounds Levels in Industrial Complex and Nearby Residential Areas of Daegu

Wan-Kuen Jo and Gin-Woo Lee*

Department of Environmental Engineering, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea
*Nakdong River Environmental Research Center, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea
(Manuscript received 10 November, 2003; accepted 13 May, 2004)

Air pollution from the Daegu industrial complex (DIC) in Korea has been a common nuisance and cause of complaints for nearby residents. The current study measured the indoor and outdoor levels of six VOC (benzene, toluene, ethylbenzene, and three isomeric xylenes) at two residential areas with a different proximity to the DDIC, plus the ambient levels at two industrial areas within the boundary of the DDIC. The QA/QC program included the range of correlation coefficient (0.94~0.99) for calibration curves, within the permissible range. Toluene was the most abundant VOC in the ambient air both in residential and industrial areas. Both indoor and outdoor air concentrations of all target VOC except benzene were higher in residential area near the DIC compared to that further away from the DIC. Moreover, the ambient air concentrations of all target VOC except benzene for two industrial sites (A and B) were significantly higher than the outdoor or indoor air concentrations in the two residential areas. The findings further suggested that VOC ambient levels measured in a residential area near the DIC be used as a potential indicator of odor-causing unidentified air pollutants transported from the DIC. Moreover, it was found that the elevated ambient toluene levels outweighed the indoor sources with respect to the environmental exposure of residents nearby the DIC. However, in the residential area further away from the DIC, the toluene indoor sources outweighed the outdoor sources.

Key Words : Daegu Industrial complex, Exposure, Indoor, Outdoor, VOC

1. 서 론

대기로 방출되는 휘발성 유기화합물질(volatile organic compounds : VOC) 중에 많은 것들이 암을 유발시키거나 유발시킬 수 있는 유해 오염물질로 알려져 있다^{1~4}. VOC의 이러한 독성 때문에, 도시의 실외 및 실내 공기에 존재하는 VOC에 대한 관심이 최근 계속 증가하고 있는 추세이다^{5~9}. 미국을 포함한 선진국가들의 경우, VOC를 효율적으로 통제하기 위한 우선과제로서, 미국은 전역의 실내 및 실외 공

기중의 VOC의 오염정도에 대한 자료를 체계적인 전산화하여 활용하고, 또한 이들 자료를 지속적으로 확장하고 있으며, 이 자료를 이용하여 VOC에 대한 노출 또는 노출 및 위해성을 평가해 오고 있다^{10,11}. VOC의 노출분석과 관련한 미국의 대표적인 연구로서 U.S. Environmental Protection Agency(EPA)가 주축이 되어 수행된 Total Exposure Assessment Methodology(TEAM) studies와, 단일연구들인 Airborne Toxic Elements and Organic Substances (ATEOS) Project, 및 Urban Air Toxics Assessment Project(UATAP)를 들 수 있다^{10~13}.

국내의 경우 대기 중 VOC 오염과 노출에 대한 자료는 매우 한정되어 있다^{5~7}. 이는 공기중 VOC의 까다로운 측정기술 때문인 것으로 추정된다. 국

Corresponding Author : Wan-Kuen Jo, Department of Environmental Engineering, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea
Phone : +82-53-950-6579
E-mail : wkjo@knu.ac.kr

내에서도 공단지역의 유기용제 사용 급증으로 공단지역 VOC의 발생원으로부터 VOC 배출량이 점진적으로 증가될 것으로 추정되며, 결과적으로, 인근지역의 대기중의 VOC에 대한 오염도가 증가될 것으로 예상된다. 또한, 일부 VOC는 실외공기에서보다 실내공기에서 오히려 높은 농도로 검출된다는 점에서, 실내공기에서의 VOC에 대한 중요성이 함께 강조되어야 한다. 국내의 경우 VOC의 공단지역 주민들의 노출 평가와 관련하여 울산과 여천공단지역에서 실외에 국한되어 수행된 연구가 있다. 그러나, 앞의 국내 연구에서는 VOCs의 특성이 고려되지 않은 채 수 시간 내의 시료채취법을 사용하였다. 따라서, 공단지역의 경우 VOCs의 유독성을 고려하여 선진국의 기법과 같이 장시간 노출평가가 수행되어야 합리적으로 공단지역 주민들의 VOCs에 대한 노출평가가 이루어질 수 있다.

대구지역의 기상적인 특성도 대기오염의 수평확산이 적은 저풍속 빈도가 56%이고 대기오염의 수직확산에 불리한 대기 안정도의 발생빈도가 80%를 차지하고 있다. 더욱이, 대구지역의 계절에 따라 다소 변동이 있지만 주 풍향이 북서풍으로서 서구지역에 위치한 산업체에서 배출시키는 대기오염이 도심지로 이동하여 많은 시민들에게 심각한 대기오염 피해를 유발시키고 있는 실정이다. 그러나, 공단에 의한 인근 주민들의 대기오염 문제는 담당 공무원의 경험 또는 개인적 판단에 근거하여 평가되어 왔고, 이러한 평가 결과는 공단지역의 환경담당자와 대구광역시 모두 불만의 대상이 되고 있다. 따라서, 오염물질 배출자와 피해자 모두에게 설득력 있는 공단에 의한 대기오염 관리방안을 수립하기 위해서는 공단의 공기질과 인근 주거지역의 공기질에 대한 과학적인 자료가 우선적으로 확보되어야 한다. 결과적으로, 본 연구는 공단에서 배출량이 많을 것으로 예상되는 VOC를 대상으로 공단지역과 인근 주거지역의 VOC 오염도를 평가하고자 한다. 본 연구결과는 공업지역에 인접한 주민의 VOC에 대한 인체 위해성 평가(risk assessment)와 이에 근거한 대구광역시 공단지역의 VOC의 관리방안 수립을 위한 필수 자료로 활용될 것으로 기대된다.

2. 연구방법

본 연구에서는 대구광역시 공단지역 한 곳을 선정하여 공단내부에서 발생하는 VOC 그리고 공단지역과 인접한 주거 지역의 VOC 오염도를 조사하고 도출된 자료를 통계적으로 분석하여 공단과 인접주민들 간의 노출 관계를 평가하였다.

2.1. VOC 선정

본 연구를 위한 VOC의 분석은, 대표적인 VOC로

서 각종 유기용제에 포함되어 공단지역에서 사용되거나^{18~20)} 독성학적으로는 발암가능성과 광화학 스모그 유발인자로 알려져 있는 벤젠(benzene), 톨루엔(toluene), 에틸벤젠(ethylbenzene), 자일렌(xylene)을 효과적으로 분석하기 위해 U.S EPA Method TO-1을 응용하였다^{10,11,13)}.

2.2. 공단지역의 VOC 오염도 조사

공단의 산업공정으로부터 발생하는 VOC의 발생과 이로 인한 공단 내부 활동자들의 인체 노출을 효과적으로 평가하기 위해 시료채취시간은 대표적인 공장가동시간인 오전 8시에서 오후 8시까지 총 12시간으로 설정하고, 시료채취지점은 공단의 오염정도를 대표할 수 있는 공단 내부 중심지역을 선정한다. 다음 인체 노출을 대표하기 위해 호흡영역 높이인 지표면 상부 1.5 m 지점으로 선정하였다. 공기시료채취를 위한 유량은 10~30 ml/min를 초과하지 않는 범위에서 전 단계연구를 통해 확인된 흡착제의 분기점을 고려하여 조절되었다¹⁴⁾.

2.3. 공단과 인접한 주거지역의 VOC 오염도 조사

공단지역과 인접한 주거지역의 VOC 오염도를 공단으로부터의 인접 거리에 따라 평가함으로써 공단 인접 주택에서의 VOC 노출 정도를 직접적으로 평가함과 동시에 공단에서 배출되는 이들 물질들에 의한 간접영향을 평가하고자 하였다. 이를 위해서 공단지역을 중심으로 300 m 이내에 위치한 주택과 500 m 이상 떨어져 있는 주택을 선택하여 공단 내부 노출 평가 시료채취 시간과 동일한 시간대에 공기시료를 채취하였다. 이때 시료를 채취하는 주택은 공단 인접 주택의 VOC의 일반적인 양상을 평가하기 위해 무작위로 선정되나, 공단과의 거리별 노출양상을 효과적으로 평가하기 위해서 공단으로부터 해당 거리에 위치한 주택들을 쌍으로 선정하여 동시 실험하며 통계적인 분석이 가능하도록 충분한 조사가 수행되었다. 각 주택의 공기시료는 주택 거주인의 생활에 불편을 끼치지 않으면서 거주자들의 VOC에 대한 노출정도를 효과적으로 대변할 수 있도록 실외 및 실내 각 지점의 호기영역에서 동시에 채취되었다.

2.4. VOC의 시료 채취와 분석

VOC의 시료 채취를 위해서는 개인시료채취기를 연결한 흡착 트랩(trap)을 이용하는 건식흡착기법과 열탈착장치 및 가스크로마토그래피를 이용하는 분석기법이 이용되었다. 사용된 흡착 트랩은 용제 세척법을 이용하여 세척된 흡착제(adsorbent)를 1/4 인치 스테인레스 스틸 튜브에 충전시킨 다음 280°C 이상으로 유지시킬 수 있는 건조오븐기 내부에서 48 시간 이상 컨디셔닝(conditioning)하여 준비되었다. 흡

착트랩의 재현성(recovery) 검정과 흡착제의 분기점(breakthrough volumn) 실험 및 외부표준물질을 이용한 검정곡선실험이 수행되었다. VOC 노출을 평가하기 위해 채취되는 시료는 매일 한 개의 복수시료(duplicate)를 채취·분석하여 시료채취과정의 정확성을 평가하고, 실험실 공시료, 현장 공시료 및 외부표준물질을 매일 분석하여 당일의 실험결과를 검정하였다. 시료채취를 위해 요구되는 인력과 시간을 절약할 수 있도록 본 연구에서는 VOC 자동 시료채취장치를 제작 활용할 수 있도록 연구·고안하였다. 본 실험에 사용될 VOC 자동 시료채취 장치는 이동이 용이하고 전기 공급이 없는 곳에서도 10 시간이상 운전이 가능하도록 교환형 건전지를 활용하며, 흡착트랩의 교환이 용이하도록 제작되었다.

2.5. 통계분석과 노출모형을 이용한 공단 거주자와 인접주민들의 VOC 노출 평가

VOC 오염 자료를 통계 팩키지(SAS version 8.1)를 이용하여 분산분석(analysis of variance, ANOVA)을 실시하고 노출모형을 이용하여 공단 거주자의 영향과 공단에서 발생하는 VOC이 인접 주택에 미치는 영향과 주택의 실내외 VOC의 노출을 평가하였다. 이를 통해 공단에서 발생하는 VOC가 인접 주택에 미치는 영향과 주택의 실내·외 노출 농도간의 영향성 및 각 측정 지점의 신뢰수준을 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 자료의 정도관리 프로그램

각 target VOCs에 대한 검정선의 상관계수는

Table 1. Precision, minimum detection limit(MDL), and recovery for the analysis of target air VOCs

VOCs	Precision(%) ^a	MDL($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Recovery(%)
Benzene	10	0.27	93
Toluene	12	0.20	107
Ethylbenzene	11	0.18	93
m,p-Xylene	8	0.11	94
o-Xylene	10	0.13	92

Note. Precision represents relative standard deviation of seven replicate analyses

0.94~0.99로서 허용한계에 있었으며, 외부 표준물질을 이용한 검정선의 확인 결과에 근거하여 2개의 검정선이 결정되었다. 실험실 및 현장 공시료 시험의 경우 연구 초기에 트랩용량의 5배정도의 trap container를 이용하여 보관 및 운반했을 때 실험실 및 현장 공시료의 오염이 발견되었고, 트랩용기와 유사한 크기의 trap container를 이용함으로써 공시료의 오염문제가 해결되었다.

각 target VOCs에 대하여 결정된 분석 정밀도, 검출한계, 및 회수율은 Table 1과 같다. 각 선정 VOC에 대한 정밀도와 회수율은 각각 미국 EPA가 허용하는 정밀도인 20% 이하, 그리고 허용 회수율인 80~120% 범위 내로 나타났다. Toluene의 경우 회수율이 100%를 초과하는데 이는 Tenax를 이용하여 VOC를 분석할 때 일반적으로 나타나는 현상으로 Tenax의 offgas 때문이다. 한편 검출한계의 경우 분자내 탄소수가 가장 많은 m,p-Xylene, o-Xylene이 낮게, Ethylbenzene이 중간정도, 그리고 Toluene과 Benzene이 다소 높게 나타났고 이는 FID의 특성과 일치된다.

Table 2는 측정지점별로 채취된 시료들의 각 target VOCs에 대하여 결정된 검출율을 나타낸다. 공단지역 두 군데에서 채취된 대기 시료들은 모든 target VOCs에 대하여 100%의 검출율을 나타내었다. 공단과 가까이 인접한 주거지역 A에서는 실내공기의 경우 o-Xylene를 제외한 모든 target VOCs에 대하여 100%의 검출율을 나타내었고, o-Xylene의 경우에도 96%의 높은 검출율을 나타내었다. 한편, 주거지역 A의 실외공기의 경우, Toluene과 Ethylbenzene이 100%의 검출율을 나타내었고, Benzene, m,p-Xylene, 그리고 o-Xylene은 검출율이 각각 96, 96 및 92%로 나타났다. 공단과 다소 떨어져 위치해 있는 주거지역 B에서는 실내공기의 경우 Ethylbenzene과 o-Xylene를 제외한 target VOCs에 대하여 100%의 검출율을 나타내었고, Ethylbenzene이 96%의 비교적 높은 검출율을 나타낸 반면에 o-Xylene은 85%의 낮은 검출율을 나타내었다. 주거지역 B의 실외공기의 경우, Toluene만이 100%의 검출율을 나타내었고, Benzene, Ethylbenzene, 및

Table 2. Proportional percent of detected samples for VOCs to all samples collected in the two industrial and residential sites each

VOCs	Industry A (n=20)	Industry B (n=20)	Resident A		Resident B	
			Indoor (n=20)	Outdoor (n=20)	Indoor (n=20)	Outdoor (n=20)
Benzene	100	100	100	96	100	92
Toluene	100	100	100	100	100	100
Ethylbenzene	100	100	100	100	96	94
m,p-Xylene	100	100	100	96	100	92
o-Xylene	100	100	96	92	85	82

m,p-Xylene의 검출율이 각각 92, 94 및 92%로 상대적으로 높게 나타난 반면에 실내공기와 유사하게 o-Xylene은 82%의 낮은 검출율을 나타내었다.

3.2. 공단지역의 VOC 오염도

대구광역시에 소재한 공단지역 내부 외기 호흡영역에서의 VOC 오염도를 조사하였다. 본 연구에서는 자료의 정도를 높이기 위하여 두 개의 공단지역에서 조사대상 오염물질들을 동시에 측정하였고 이에 대한 결과의 요약이 Table 3에 제시되었다. 조사된 두 개 공단지역 모두에서 Toluene이 조사대상오염물질 중에 가장 높은 농도로 나타났다. 공단의 조사지역 A와 B에서 Toluene의 대기 중앙값 농도가 각각 207 및 190 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 중앙값 농도를 기준으로 할 때 조사지역 A와 B 모두에서 Toluene에 이어서 m,p-Xylene, o-Xylene, Ethylbenzene 그리고 Benzene의 순서로 높게 나타났다.

두 개의 조사지역을 비교할 때, Toluene과 m,p-Xylene의 경우 조사지역 A에서 다소 높게 나타났고 다른 오염물질에 대해서는 오히려 조사지역 B에서 다소 높게 나타났다. 그러나, 통계적으로 분석한 결과 이들 두 지역에서 조사된 오염도는 모든 조사대상오염물질에 대하여 유의성이 없는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 이들 두 지역에서 조사된 자료들이 하나의 자료 집단으로 활용될 수 있음을 의미한다.

이렇게 공단지역에서 조사된 VOCs의 농도는 Benzene을 제외하고는 모두 Table 4에 제시된 두 개의 주거지역에서 동시에 조사된 실외 농도보다 훨씬 높은 것으로 나타났다. Toluene의 경우 공단지역 A와 B에서는 중앙값 농도가 각각 207 및 190 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 높게 나타난 반면에, 주거지역 A와 B에선 중앙값 농도가 각각 130 및 40.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 낮게 나타났다. Ethylbenzene의 경우 공단지역 A와 B에서는 중앙값 농도가 각각 7.3 및 10.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 높게 나타난 반면에, 주거지역 A와 B에선 중앙값 농도가 각각 5.1 및 2.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 낮게 나타났다. m,p-Xylene의 경우 공단지역 A와 B에서는 중앙값 농도가 각각 15.3 및 14.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 높게 나타난 반면에, 주거지역 A와 B에선 중앙값 농도가 각각 10.6 및 3.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 낮게 나타났다. o-Xylene의 경우 공단지역 A와 B에서는 중앙값 농도가 각각 8.7 및 11.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 높게 나타난 반면에, 주거지역 A와 B에선 중앙값 농도가 각각 6.7 및 2.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 낮게 나타났다. 이러한 공단지역의 대기농도와 주거지역의 대기농도의 차이는 통계적으로 유의성이 있는 것으로 나타났다. 한편, 벤젠의 경우 공단지역 A와 B에서는 중앙값 농도가 각각 6.1 및 8.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났고, 주거지역 A와 B에선 중앙값 농도가 각각 7.16 및 6.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로서 공단지역과 주거지역간에 통계적인 차

Table 3. Summary of industrial ambient air VOC concentrations($\mu\text{g}/\text{m}^3$) measured in two industrial sites

VOCs	Industry A (n=20)				Industry B (n=20)			
	Mean	S.D.	Median	Max	Mean	S.D.	Median	Max
Benzene	8.8	6.9	6.1	26.0	10.5	8.0	8.2	27.8
Toluene	220	87.0	207	405	201	77.5	190	452
Ethylbenzene	7.5	4.8	7.3	19.3	9.1	5.5	10.4	20.9
m,p-Xylene	16.4	8.8	15.3	39.3	18.6	12.7	14.4	42.8
o-Xylene	10.1	6.1	8.7	31.1	12.4	9.4	11.3	35.6

Note. Not detected values were used as "MDL \times 1/2" for these calculations; number of samples

Table 4. Summary of residential ambient air VOC concentrations($\mu\text{g}/\text{m}^3$) measured in two residential areas relative to the close proximity to a Daegu industrial complex

VOCs	Resident A (n=20)				Resident B (n=20)			
	Mean	S.D.	Median	Max	Mean	S.D.	Median	Max
Benzene	7.8	4.9	7.1	23.3	8.0	4.4	6.3	19.6
Toluene	132	43.2	130 ^a	242	48.9	24.9	40.4 ^a	134
Ethylbenzene	5.5	3.6	5.1 ^a	15.4	3.0	2.0	2.6 ^a	7.3
m,p-Xylene	11.9	5.4	10.6 ^a	24.0	6.0	5.6	3.9 ^a	23.0
o-Xylene	7.0	3.5	6.7 ^a	15.2	2.5	1.5	2.2 ^a	7.6

Note. Not detected values were used as "MDL \times 1/2" for these calculations; number of samples

^aIndicates that residential ambient air concentrations between area A and area B were significantly different at $p < 0.05$

이를 나타내지 않았다.

3.3. 공단과 인접한 거주지역의 VOC 오염도

공단지역과 인접한 주거지역의 VOC의 오염도를 공단으로부터의 인접 거리에 따라 평가함으로써 공단 인접 주택에서의 VOC 노출 정도를 평가하였다. Table 4와 5는 각각 공단으로부터의 인접 거리에 따른 실외와 실내의 VOCs 오염도에 대한 요약을 나타내고 있다. 실외공기의 경우, Benzene을 제외한 모든 조사대상오염물질에 대하여 공단지역에 인접한 주거지역 A에서 높은 농도로 나타났다. Toluene의 중앙값 농도의 경우 주거지역 B(40.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 보다 주거지역 A(130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)에서 3.2배 높게 나타났다. Ethylbenzene의 중앙값 농도의 경우 주거지역 B(2.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 보다 주거지역 A(5.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)에서 2배 높게 나타났다. m,p-Xylene의 중앙값 농도의 경우 주거지역 B(3.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 보다 주거지역 A(10.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)에서 2.7배 높게 나타났다. o-Xylene의 중앙값 농도의 경우 주거지역 B(2.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 보다 주거지역 A(6.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)에서 3배 높게 나타났다. 따라서, 공단에 가까이 인접한 지역에 거주하는 주민들은 공단으로부터 어느 정도 떨어져 거주하는 주민들에 비하여 Benzene을 제외한 모든 조사대상오염물질에 대하여 실외공기에 의해서 훨씬 높은 농도로 노출된다는 사실이 입증되었다.

실외공기와 유사하게 실내공기의 경우에도 Benzene을 제외한 모든 조사대상오염물질에 대하여 공단지역에 인접한 주거지역 A에서 높은 농도로 나타났다. Toluene의 중앙값 농도의 경우 주거지역 B(61.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 보다 주거지역 A(135 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)에서 2.2배 높게 나타났다. Ethylbenzene의 중앙값 농도의 경우 주거지역 B(3.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 보다 주거지역 A(8.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)에서 2.4배 높게 나타났다. m,p-Xylene의 중앙값 농도의 경우 주거지역 B(7.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 보다 주거지역 A(17.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)에서 2.2배 높게 나타났다. o-Xylene의 중앙값 농도의 경우 주거지역 B(3.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 보다

주거지역 A(10.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)에서 2.9배 높게 나타났다. 따라서, 공단에 가까이 인접한 지역에 거주하는 주민들은 공단으로부터 어느 정도 떨어져 거주하는 주민들에 비하여 Benzene을 제외한 모든 조사대상오염물질에 대하여 실외공기 뿐만 아니라 실내공기에 의해서도 훨씬 높은 농도로 노출된다는 사실이 입증되었다.

실내공기와 실외공기를 비교할 때, 조사지역 A에서는 Toluene을 제외하고는 모든 조사대상오염물질들에 대하여 실내공기에서 높은 농도로 나타났다. 조사지역 A의 경우, Toluene의 중앙값 농도가 실외공기(130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)와 실내공기(135 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)가 통계적으로 유의성이 없이 서로 유사하게 나타났다. 그러나, 조사지역 A의 Benzene의 경우, 중앙값 농도가 실외공기(7.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 보다 실내공기(11.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)가 1.6배 높게 나타났다. 조사지역 A의 Ethylbenzene의 경우, 중앙값 농도가 실외공기(5.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 보다 실내공기(8.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)가 1.6배 높게 나타났다. 조사지역 A의 m,p-Xylene의 경우, 중앙값 농도가 실외공기(10.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 보다 실내공기(17.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)가 1.6배 높게 나타났다. 조사지역 A의 o-Xylene의 경우, 중앙값 농도가 실외공기(6.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 보다 실내공기(10.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)가 1.5배 높게 나타났다. 따라서, 조사지역 A에서는 Toluene의 경우에는 실외 오염원(인접한 공단)이 실내 오염원을 훨씬 초과하였기 때문에 실내와 실외 공기 농도가 유사하게 나타났고, 다른 조사대상오염물질의 경우에는 높은 실외공기 농도를 고려할 때 실외 오염원(인접한 공단)과 실내 오염원이 복합적으로 작용하여 실외공기 보다 실내 공기 농도가 높게 나타난 것으로 사료된다.

조사지역 B에서는 모든 조사대상오염물질들에 대하여 실외공기와 비교할 때 실내공기에서 높은 농도로 나타났다. 조사지역 B의 Toluene의 경우, 중앙값 농도가 실외공기(40.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 보다 실내공기(61.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)가 1.5배 높게 나타났다. 조사지역 A의 Benzene의 경우, 중앙값 농도가 실외공기(6.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 보

Table 5. Summary of residential indoor air VOC concentrations($\mu\text{g}/\text{m}^3$) measured in two residential areas relative to the close proximity to a Daegu industrial complex

VOCs	Resident A (n=20)				Resident B (n=20)			
	Mean	S.D.	Median	Max	Mean	S.D.	Median	Max
Benzene	13.3	7.9	11.4	29.6	11.3	5.7	10.5	25.5
Toluene	139	33.9	135 ^a	210	69.8	32.2	61.1 ^a	143
Ethylbenzene	8.9	6.1	8.0 ^a	28.4	5.6	5.1	3.4 ^a	23.7
m,p-Xylene	17.2	7.1	17.3 ^a	36.8	10.0	7.3	7.9 ^a	31.4
o-Xylene	10.9	4.8	10.3 ^a	23.1	4.9	4.6	3.6 ^a	21.4

Note. Not detected values were used as "MDL \times 1/2" for these calculations; number of samples

^aIndicates that residential indoor concentrations between area A and area B were significantly different at p<0.05

다 실내공기(10.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)가 1.7배 높게 나타났다. 조사지역 A의 Ethylbenzene의 경우, 중앙값 농도가 실외공기(2.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 보다 실내공기(3.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)가 1.3배 높게 나타났다. 조사지역 A의 m,p-Xylene의 경우, 중앙값 농도가 실외공기(3.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 보다 실내공기(7.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)가 2배 높게 나타났다. 조사지역 A의 o-Xylene의 경우, 중앙값 농도가 실외공기(2.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 보다 실내공기(3.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)가 1.6배 높게 나타났다. 따라서, 조사지역 A와는 달리, 조사지역 B에서는 Toluene을 포함한 모든 조사대상오염물질에 대하여 실내 오염원이 실외 오염원을 초과하기 때문에 실외공기 보다 실내 공기 농도가 높게 나타난 것으로 사료된다.

3.4. 공단내 거주자들의 유해 휘발성 유기화합물 질 노출

공단지역에 거주 또는 근무하는 사람들의 낮 12 시간 동안의 VOCs 노출량을 다음의 방정식을 이용하여 계산하였다:

$$E_h = C \times I \times T \quad (1)$$

- 여기서, E_h = 흡기노출량(μg),
- C = VOC 평균농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$),
- I = intake rate($\text{m}^3/0.5 \text{ day}$),
- T = 노출시간(0.5 day)

이 방정식에 이용된 변수중 하루 공기 흡입률은 10 $\text{m}^3/0.5 \text{ day}$ 그리고 인체 흡수율은 100% 이다. Table 6은 공단지역내 거주자들의 노출량과 선진연구에서 계산된 대구의 일반 주거지역 주민들의 노출량을 비교한다. Benzene의 경우, 공단지역내 거주자들의 노출량이(97 μg) 대구의 일반 주거지역 주민들의 노출량에(4 μg) 비하여 24.3 배 높게 나타났다. Toluene의 경우, 공단지역내 거주자들의 노출량이(2105 μg) 대구의 일반 주거지역 주민들의 노출량에(24 μg) 비하여 86.6 배 높게 나타났다. Ethylbenzene의 경우, 공단지역내 거주자들의 노출량이(83 μg) 대구의 일반 주거지역 주민들의 노출량에(6 μg) 비하여 13.8 배 높게 나타났다. m,p-Xylene의 경우, 공단지역내 거주자들의 노출량이(175 μg) 대구의 일반 주거지역 주민들의 노출량에(13 μg) 비하여 13.5 배

높게 나타났다. o-Xylene의 경우, 공단지역내 거주자들의 노출량이(113 μg) 대구의 일반 주거지역 주민들의 노출량에(7 μg) 비하여 16.1 배 높게 나타났다. 따라서, 공단지역 거주자들의 방향족 VOCs 노출량이 오염물질의 종류에 따라 일반 주거지역 주민들의 노출량보다 13.5 배에서 86.6 배 까지 높게 나타났으므로 공단지역 거주자들의 건강을 보호하기 위해서는 이들 VOCs들에 대한 관리대책이 조속히 이루어져야 하겠다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 공단지역과 인근 주거지역의 VOC 오염도가 평가되었다. 조사된 두 개 공단지역 모두에서 Toluene이 조사대상오염물질 중에 가장 높은 농도로 나타났다. 중앙값 농도를 기준으로 할 때 두 개 공단지역 모두에서 Toluene에 이어서 m,p-Xylene, o-Xylene, Ethylbenzene 그리고 Benzene의 순서로 높게 나타났다. 실외공기와 실내공기모두에서 Benzene을 제외한 모든 조사대상오염물질에 대하여 공단지역에 인접한 주거지역에서 높은 농도로 나타났다. 따라서, 공단에 가까이 인접한 지역에 거주하는 주민들은 공단으로부터 어느 정도 떨어져 거주하는 주민들에 비하여 Benzene을 제외한 모든 조사대상오염물질에 대하여 실외공기 뿐만 아니라 실내공기에 의해서도 훨씬 높은 농도로 노출된다는 사실이 입증되었다.

실내공기와 실외공기를 비교할 때, 공단 인근 주거지역에서는 Toluene의 경우에는 실외 오염원(인접한 공단)이 실내 오염원을 훨씬 초과하였기 때문에 실내와 실외 공기 농도가 유사하게 나타났고, 다른 조사대상오염물질의 경우에는 높은 실외공기 농도를 고려할 때 실외 오염원(인접한 공단)과 실내 오염원이 복합적으로 작용하여 실외공기 보다 실내 공기 농도가 높게 나타난 것으로 사료된다. 그러나, 공단에서 다소 떨어진 조사지역에서는 Toluene을 포함한 모든 조사대상오염물질에 대하여 실내 오염원이 실외 오염원을 초과하기 때문에 실외공기 보다 실내 공기 농도가 높게 나타난 것으로 사료된다. 결론적으로, 공단에서 배출되는 VOC가 인근지역으로 이동하여 인근 주거지역의 VOC 오염도를 결정

Table 6. Daytime ambient air exposures (μg) to aromatic VOCs in industrial sites and residential areas in Daegu

Area	Benzene	Toluene	Ethylbenzene	m,p-Xylene	o-Xylene
Industry	97	2105	83	175	113
Resident	4	24	6	13	7

Note. Industrial values were average of two industrial site means measured in this study; residential values were calculated by dividing the daily exposure by 2

하는 주요한 인자임을 시사한다. 따라서, 공단지역 거주자들과 인근 주거지역 주민들의 VOC 노출에 의한 건강 위해도를 감소시키기 위해서는 공단 배출 VOCs들에 대한 관리대책이 수립되어야 하겠다.

감사의 글

본 연구는 대구지역환경기술개발센터에서 시행한 “환경기술개발사업”의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) International Agency for Research on Cancer (IARC), 1987, Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans, Supplement 7, 11-12.
- 2) Tancrede, M. R., W. L. Zeise and E. A. C. Crouch, 1987, The carcinogenic risk of some organic vapors indoors: a theoretical survey, *Atmos. Environ.*, 21, 2187-2205.
- 3) U.S. EPA, 1990, Cancer risk from outdoor exposure to air toxics, PA-450/1-90-004a.
- 4) Mehlman, M. A., 1998, Dangerous and cancer-causing properties of products and chemicals in the oil-refining and petrochemical industries. Part-XXV: Neurotoxic, allergic, and respiratory effects in humans from water and air contaminated by MTBE in gasoline, *J. Clean Technol. Environ. Toxicol. Occup. Med.*, 7, 65-84.
- 5) 환경부, 1996, 대기오염물질 위해성 평가 및 관리기술.
- 6) 한화진, 1994, 대기 중 유해물질 관리대책, 환경기술개발원, 4-5pp.
- 7) 조완근, 강귀화, 우형택, 박종길, 1995, 미규모 환경에서의 휘발성 유기화합물질 노출, *한국환경과학회지*, 5, 447-459.
- 8) Monod, A., B. C. Sive, P. Avino, T. Chen, D. R. Blake and F. S. Rowland, 2001, Monoaromatic compounds in ambient air of various cities: a focus on correlations between the xylenes and ethylbenzene, *Atmos. Environ.* 35, 135-149.
- 9) Brodzinsky, R. and H. B. Singh, 1983, Volatile Organic Chemicals in the Atmosphere: An Assessment of Available Data, Environmental Sciences Research Laboratory, U.S. EPA, EPA-600/3-83-027(a).
- 10) Lioy, P. J., 1990, Assessing total human exposure to contaminants, *Environ. Sci. Technol.*, 24, 938-945.
- 11) Lioy, P. J. and J. M. Daisey, 1986, Airborne-toxic elements and organic substances, *Environ. Sci. Technol.*, 20(1), 8-14.
- 12) USEPA, 1995, Compilation of Air Pollutant Emission Factor, Vol. 1, Stationary Point and Area Sources, AP-42.
- 13) U.S. EPA, 1993, Staten Island/New Jersey Urban Air Toxics Assessment Project Report, U.S. Environmental Protection Agency, EPA/902/R-93-001.
- 14) Jo, W. K., L. Berrafato, C. Pietarinen and A. Digioia, 1988, Field Sampling for Volatiles at a Residential Site, 81st Annual Meeting of Air Pollution Control Association, Dallas, Texas.
- 15) Wallace, L. A., E. D. Pellizzari, T. D. Hartwell, V. Davis, L. C. Michael and R. W. Whitmore, 1989, The influence of personal activities on exposure to volatile organic compounds, *Environ. Res.*, 50, 37-55.
- 16) Edwards, R. D., J. Jurvelin, K. Koistinen, K. Saarela and M. Jantunen, 2001, VOC source identification from personal and residential indoor, outdoor and workplace microenvironment samples in EXPOLIS-Helsinki, Finland, *Atmos. Environ.*, 35, 4829-4841.
- 17) Ilgen, E., N. Karfich, K. Levsen, J. Angerer, P. Schneider, J. Heinrich, H. Wichmann, L. Dunemann and J. Begerow, 2001, Aromatic hydrocarbons in the atmospheric environment: Part I. Indoor versus outdoor sources, the influence of traffic, *Atmos. Environ.*, 35, 1235-1252.
- 18) Choi, D. H., 2000, Implementation of odor abatement program in the southern area of Daegu. Environmental Pollution Management Department, Daegu Regional Environmental Management Agency, MD-67221-1249.
- 19) Industrial Safety & Health Bureau (ISHB), 1994, Handbook of Industrial Hygiene Affairs, Industrial Safety Department, Ministry of Labor, Republic of Korea.
- 20) Kim, S. D., 1999, General Information of Korean Petroleum Chemistry, Chemical Information Service, Seoul, Korea, 74-76pp.