



VOCs의 인체영향과 관리동향

김 윤 신

한양대학교 산업의학과(yoonshin@hanyang.ac.kr)

서론

대기 중에는 미량으로 존재하여도 대기 환경 및 인체에 위해성이 큰 VOCs, 다이옥신, 석면, 중금속, 다환방향족 탄화수소 등과 같은 유해 대기오염물질이 존재한다. 이러한 물질들의 특성은 낮은 농도에서도 독성, 발암잠재성, 지속성, 확산 특성 및 생체 축적 등 건강과 환경에 많은 영향을 초래하고 있다. 그 중에서도 VOCs는 최근 급격한 자동차의 증가와 각종 유기용제의 사용량 증가로 인하여 대기 중의 휘발성 유기화합물질(volatile organic compounds : VOCs)의 배출량이 증대되고 있다. 특히, VOCs는 질소산화물과 함께 대기 중에서 빛에너지에 의해 광화학 옥시단트를 형성하고 대류권의 오존형성에 기여하는 것으로 밝혀졌다. 또한 최근 많은 VOCs가 도시환경에서 중요한 발암(carcinogen)인자로 확인되고 있다.

국내에서는 VOCs 규제관리의 법적 근거가 1995년에 마련되었으며, 관리의 역사가 짧음에도 불구하고 그 동안 규제관리의 개선 등 많은 발전이 있었던 것은 사실이다. 그 동안 정부는 VOCs배출 최소화를 위한 업무처리지침을 1997년 발간하였고 2000년 4월에는 VOCs 방지시설 설치 수요자가 보다 경제적이고 효율적인 방지시설을 쉽게 선택할 수 있도록 "휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침"을 마련, 배포하는 등 많은 노력을 기울였다.

대기중의 유기화합물들은 여러가지 측면에서 분류되고 있으나 각 물질의 존재 상(phase) 형태에 따라 휘발성(volatile), 반 휘발성(semi-volatile), 비휘발성(non-volatile)의 세 그룹으로 분류된다. 대체

로 휘발성 유기화합물(volatile organic compounds, VOCs)은 증기압이 10~2kPa 이상이며, 반 휘발성 유기화합물(SVOC)은 10~2kPa에서 10~8kPa 정도, 비휘발성 유기화합물(NVOC)은 10~8kPa 이하의 증기압을 가지는 물질에 해당된다.

그러나 대부분 대기 환경 중 VOCs라 함은 탄화수소화합물의 총칭으로 방향족 탄화수소와 지방족 탄화수소(Paraffin계와 Olefin계) 등의 일탄 탄화수소와 질소, 수소 및 할로겐원소를 포함하는 비균질 탄화수소(Heterogeneous Hydrocarbon, 예 - 알데히드, 케톤류 등)로 분류된다. 특히 VOCs는 방향족 탄화수소와 할로젠탄화수소와 같이 화합물 자체로서도 환경 및 건강에 직접 유해하거나 지방족 탄화수소와 같이 주로 대기중의 광화학 반응에 참여하여 광화학 탄화물 등의 2차 오염물질을 생성할 수 있다. 올레핀계 탄화수소화합물은 광화학 반응성이 큰 것으로 이미 잘 알려져 있다. 즉, 탄소와 수소만으로 구성된 탄화수소류와 할로겐화 탄화수소, 질소나 황 함유 탄화수소 등 상온·상압에서 기체 상태로 존재하는 모든 유기화합물을 통칭하는 의미로 사용되며 넓은 의미로는 반 휘발성 유기화합물도 포함된다.

VOCs는 오존 등 광화학스모그 원인물질일 뿐만 아니라 발암성 등의 유해물질, 지구온난화외 성층권 오

〈표 1〉 오염원으로부터의 VOCs 발생량

배출원	도장	자동차	주유소	유류 저장, 출하	인쇄	도로 포장	세탁	계
배출량 (천톤/년)	282	213	32	28	21	20	14	611
비율(%)	46.2	34.9	5.3	4.6	3.6	3.2	2.2	100



존 파괴의 원인물질, 대기 중 악취물질로서 환경 및 건강에 영향을 초래하여 VOCs감축을 대기질 관리의 주요 정책수단으로 이용하는 국가가 증가하는 추세이다.

국내 관리대상물질과 배출업소

탄화수소(HC)는 탄소와 수소로 구성된 유기화합물로서, 대기중에서 기체, 액체 또는 고체상태로 존재하며, 산소, 질소, 염소, 황 등과 반응하여 여러 가지 탄화수소 유도체를 생성한다.

탄화수소는 메탄계 탄화수소와 비메탄계 탄화수소(NMHC)로 분류된다. 화석연료의 대부분은 탄화수소이며 석탄과 석유는 고분자 탄화수소로, 천연가스는 메탄과 같은 저분자 탄화수소로 구성되어 있다. 메탄은 주로 논, 광산, 식물의 사체 등 혐기성 습지에

서 박테리아에 의한 발효과정에서 생성되고, 천연가스층이나 석탄층에서 방출되거나 유기물질의 불완전 연소 시 발생된다.

비메탄계 탄화수소의 자연발생원 중 가장 규모가 큰 것은 삼림으로 온대지방에서는 생육이 왕성한 여름에 많은 양이 배출되고, 침엽수보다 활엽수에서 발생량이 많으며, 식물의 종이 나 삼림형에 따라 발생량이 다르다. 인위적 발생원으로는 차량(주로 가솔린)의 배기관 배출가스와 증발배출에 의한 탄화수소 이외에 도장·인쇄업과 세탁업, 유기합성공업, 석유정제공업 등 유기용제의 제조·사용공정, 쓰레기 소각, 산물 등이 있다. 발생량으로 추정해 보면 지구 전체적으로는 수송기관에 의한 것이 60%로 가장 많고, 산업활동에 의한 것이 12%, 가정이나 공장의 연소 과정에서 배출되는 것이 2.5%를 차지한다. 환경부(1997) 자료를 보면 도장시설에서 전체 배출량 중 46.2%로 가장 높은 비율을 차지하고 있으며 지구 전체의 배출량과는 다른 특징을 보이고 있다.

VOCs는 상온·상압에서 기체상태로 존재하는 모든 유기성 물질을 통칭하는 의미로 사용되고 있다. VOCs에 속하는 화합물로는 방향족 탄화수소와 질소, 산소 및 할로젠 원소를 포함하는 비균질 탄화수소(heterogeneous hydrocarbon : 예, 알데히드, 케톤류 등)가 해당된다. 특히 VOCs는 방향족 탄화수소나 할로겐화 탄화수소와 같이 화합물 자체로서도 환경 및 건강에 직접유해하거나 지방족 탄화수소와 같이 주로 대기중의 광화학반응에 참여하여 광화학산화물 등의 2차적 유해를 초래할 수도 있다. 특히, 탄소-탄소 원자사이에 2중결합을 갖는 올레핀계 탄화수소 화합물은 광화학 반응성이 큰 것으로 이미 알려져 있다.

표 2는 우리나라의 VOCs 규제제품 및 물질로서 벤젠 등 총 37종류를 나타낸 것이다.

VOCs 관리대상의 업종별 배출시설 및 규모는 대기보전특별대책지역과 대기환경규제지역에 따라 달리 적용되고 있다. 대기보전 특별대책지역에서는 석유정제 및 석유화학제품 제조업, 유기용제 제조업, 도료제조업, 철강·비철금속제조업, 자동차 및 선박제조업과 기타 제조업의 6개 제조업종과 저유소 1개의 비 제조업을 포함한 총 12개 업종이며, 대기환경규제지역은 석유정제 및 석유화학제품 제조업, 유기용제 및 페인트 제조업, 선박 및 대형 철구조물 제조업,

<표 2> VOCs 규제물질과 화학식

No	Compounds	Formula
1	Acetaldehyde	CH ₃ CHO
2	Acetylene	C ₂ H ₂
3	Acetylene Dichloride	C ₂ H ₂ Cl ₂
4	Acrolein	C ₃ H ₄ O
5	Acrylonitrile	C ₃ H _{3.5} N
6	Benzene	C ₆ H ₆
7	1,3-Butadiene	C ₄ H ₆
8	Butane	C ₄ H ₁₀
9	1-Butene, 2-Butene	C ₄ H ₈ [CH ₂ CH=CHCH ₃], C ₄ H ₈ [CH ₃ (CH)=CH ₂]
10	Carbon Tetrachloride	CCl ₄
11	Chloroform	CHCl ₃
12	Cyclohexane	C ₆ H ₁₂
13	1,2-Dichloroethane	C ₂ H ₄ Cl ₂ [Cl(CH ₂) ₂ Cl]
14	Diethylamine	C ₄ H ₁₁ N[(C ₂ H ₅) ₂ NH]
15	Dimethylamine	C ₂ H ₇ N
16	Ethylene	C ₂ H ₄
17	Formaldehyde	HCHO
18	n-Hexane	C ₆ H ₁₄
19	Isopropyl Alcohol	C ₃ H ₈ O[(CH ₃) ₂ CHOHCH ₃]
20	Methanol	CH ₃ OH
21	Methyl Ethyl Chloride	C ₃ H ₇ O[CH ₃ COCH ₂ CH ₃]
22	Methylene Chloride	CH ₂ Cl ₂
23	Methyl Tertiary Butyl Ether	CH ₃ OC(CH ₃) ₂ CH ₃
24	Propylene	C ₃ H ₆
25	Propylene Oxide	C ₃ H ₆ O
26	1,1,1-Trichloroethane	C ₂ H ₃ Cl ₃
27	Trichloroethylene	C ₂ HCl ₃
28	Gasoline	-
29	Naphtha	-
30	Crude Oil	-
31	Acetic Acid	C ₂ H ₄ O ₂
32	Ethylbenzene	C ₈ H ₁₀
33	Nitrobenzene	C ₆ H ₅ NO ₂
34	Toluene	C ₇ H ₈
35	Tetrachloroethylene	C ₂ Cl ₄
36	Xylene	C ₈ H ₁₀
37	Styrene	C ₈ H ₈

자료 : 환경부고시, 제 2001-36호, 2001.



자동차 제조업 및 기타 제조업의 5개 제조업종과 저유소, 주유소, 세탁시설, 폐기물 보관·처리시설 및 자동차 정비업의 5개 비제조업을 포함한 총 10개 업종이 해당된다. 즉 특별대책지역은 제조업이 중심이 되어 관리되며, 대기환경규제지역은 규제지역에 인접하여 주민의 건강에 직접 영향을 줄 수 있는 주유소, 자동차 정비업 등 불특정 배출원 관리를 강화하는 것이 특징이다.

수도권 대기환경 규제지역의 VOCs 배출억제 및 방지시설 설치 일정을 보면 현재까지 VOCs 해당 배출업소는 총 1,322개이며 2000년 말까지 대부분 배출시설을 설치하여야 하고 주유소와 출하시설은 2004년 말까지 VOCs 방지시설을 설치하여야 한다.

VOCs의 건강영향

VOCs에 의한 중독증상은 VOCs의 구조, 노출농도와 기간, 다른 VOCs와의 복합노출, 개인의 감수성, 표적장기의 분포 등에 따라 다르게 나타난다. 그러나 고농도 VOCs에 의한 급성독성장해는 VOCs의 종류에 따른 차이가 거의 없이 비슷한 증상을 나타낸다. VOCs에 의한 독성작용으로 가장 보편적이면서 중요한 것은 중추신경계를 억제하는 마취작용이다. 증상으로는 지남력 상실(시간, 장소, 사람들을 알아보는 정신기능의 장애), 도취감, 현기증, 혼돈(일관적인 사고를 하지 못하게 하는 것)에 이어 노출농도가 점차 심해지면 의식상실, 마비, 경련, 그리고 사망에 이르게 된다. 이 외에 눈, 피부, 호흡기 점막의 자극 증상이 나타나는데, 톨루엔의 예를 들어 1회 폭로되었을 때 폭로농도에 따른 건강장해를 표 3에 표시하

<표 3> 톨루엔 1회 폭로농도에 따른 건강장해

농도(ppm)	건강장해
2.5	냄새감지의 역치
37	모든 사람이 냄새감지
50~100	피로, 졸리움, 가벼운 두통 등의 호소 신경반응이나 조화운동기능에는 변화 없음
200	인후 및 눈에 가벼운 자극증상, 조화운동과 인지기능의 가벼운 저하, 가벼운 두통과 현기증, 노출후에 피로, 혼돈, 졸리움 8시간 노출되면 조화운동에 변화가 확인됨
300	눈과 인후에 자극증상, 전반적인 조화운동의 저하, 정신적인 혼돈
400	식욕감퇴, 보행장애, 메스꺼움, 단기 기억력 저하, 반응시간 저하
500~700	심한 메스꺼움, 혼돈, 자재력 결여, 심한 신경질, 근육피로, 수면장애
800	8시간 노출 시 심한 조화운동 장애, 극심한 피로감
1,500	1시간 노출에서 즉각적인 반응시간과 혈조운동 장애, 마취되면 사망 가능성 있음
3,000	수분 내 마취되며 더 지속되면 치명적
10,000~30,000	

자료 : 환경부고시, 제 2001-36호, 2001.

였다.

이러한 중추신경계 억제작용은 독성효과의 발현이 빠르고, 원인물질의 제거와 함께 빨리 그리고 완전히 회복되는 경향을 보이고 있어 대사된 물질보다는 물질 그 자체의 독성에 의한 것으로 추정되고 있다. VOCs는 단일물질이라기 보다는 다양한 물질이 복합적으로 존재하는 경향을 보이기 때문에, VOCs에 의한 공통적인 독성작용으로서 중추신경계 억제작용은 VOCs 각각이 상가적으로 작용하여 나타나는 결과로 평가된다.

VOCs의 만성장해로는 중추신경계의 장애와 말초신경계의 장애가 있는데 VOCs에 의한 비 특이적인 만성 중추신경계 장애를 세계보건기구(WHO)에서는 기질적 정서 증후군, 경증의 만성독성 뇌병증, 그리고 중증의 만성독성 뇌병증의 3단계로 구분하고 있는데 각각의 증상은 다음의 표 4와 같다.

VOCs에 의한 말초신경 장애는 이황화탄소, 노르말렉산, 스티렌 등에 장기간 노출된 경우 나타날 수 있는데 그 증상은 초기에 손가락이나 발가락 부위에 대칭적으로 발생하는 무감각 내지는 이상감각인데 이는 점차 몸 전체로 진행된다.

각각의 휘발성 유기화합물질의 주요한 인체 영향은 다음과 같다.

- 벤젠 : 일정 수준 이상의 벤젠에 노출될 경우 중추신경계의 활동이 저하되는 등 건강에 영향을 주며, 장기간 다량 노출된 특정산업체 근로자들의 발암율이 눈에 띄게 증가하는 것과 깊은 관계가 있는 것으로 알려져 왔다. 이 물질을 고농도로 장기간 실험 동물에게 노출시켰을 경우 암을 유발하는 것으로 나타났다. 이 화학물질은 저농도로 장기간 노출된 사람들에게도 발암율이 증가될 수 있다.
- 톨루엔 : 톨루엔을 흡입하면 중추신경 계통의 기능저하가 일어나나 발암성, 변이원성, 기형성 등

<표 4> VOCs에 의한 중추신경계 장애 분류

구 분	증 상
기질적 정서 증후군	피로, 신경질, 경미한 기억력 감퇴, 집중력 장애
경증의 만성독성 뇌병증	현저한 기억력 감퇴, 전신운동 장애, 신경생리학적 검사상 이상소견, 이 경우 완전히 회복이 안되는 경우도 있음.
중증의 만성독성 뇌병증	지적 수준과 기억기능의 전반적인 저하로 말미암아 치매에 이른다. 회복되지 않거나 극히 일부 기능만 회복됨



은 유발하지 않는 것으로 보고되고 있다.

- 트리클로로에틸렌 : 일정 수준 이상 트리클로로에틸렌에 노출된 경우 건강에 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며, 동물실험 결과 암을 유발하는 것으로 알려져 있다. 실험 동물에 암을 유발시키는 화학물질들은 저농도로 장기간 노출된 사람에게도 발암율이 증가될 수 있다.
- 1,1,1-트리클로로에탄 : 1,1,1-트리클로로에탄에 일정수준 이상 노출될 경우 건강에 영향을 주는 것으로 되어 있으며, 고농도로 장기간 노출된 실험동물에서 간, 신경계, 순환계에 손상을 가져오는 것으로 알려져 있다. 저농도로 장기간 노출된 사람에게도 이와 같은 건강에 불리한 영향을 줄 수 있다.
- 테트라클로로에틸렌 : 테트라클로로에틸렌에 일정 수준이상 노출될 경우 중추 신경계의 억제 효과가 있으며 동물에게 높은 농도에서 단기간 노출시키거나 낮은 농도에서 장기간 노출시키면 신장과 간장에 손상을 입힐 수 있다. 동물실험에서 돌연변이 유발도를 증가시키며 발암 물질로 알려져 있다.
- 1,1-디클로로에틸렌 : 이 물질에 일정 수준이상 노출될 경우 건강에 영향을 주며, 장기간 동물에 노출시켰을 경우 간과 신장에 치명적인 손상을 가져오는 것으로 알려져 있다. 저농도로 장기간 노출된 사람에게도 건강에 불리한 영향을 일으킬 수 있다.
- 사염화탄소 : 사염화탄소에 일정수준이상 노출될 경우 건강에 영향을 주며 동물에게 고농도로 장기간 노출시켰을 경우 암을 유발하는 것으로 알려져 있다. 저농도로 장기간 노출된 사람에게도 발암율이 증가될 수 있다.
- 에틸벤젠, 디클로로메탄 및 크실렌 : 디클로로메탄은 발암성 및 변이원성이 있으며, 에틸벤젠 및 크실렌은 중추신경 계통의 기능을 저하시키지만 발암성, 변이원성 및 기형성 등은 유발하지 않는

것으로 보고되고 있다

관리동향

대기중에서 오존과 같은 광화학 옥시던트는 광역적으로 형성되고 산림고사등의 생태계 피해를 가속화시킨다는 연구결과가 보고됨에 따라 오존형성의 전구물질인 VOCs에 대한 관심이 점차 증가하고 있다. 1979년 UN에서 “장거리월경대기오염협약”이 채택되고 1991년에 국가연합 유럽경제위원회(UNECE)의 의정서가 미국, 캐나다, 유럽 등 23개 가맹국에 의해 체결됨으로서 북미, 유럽 각국이 협조하여 VOCs의 전지구적인 총량규제가 시작되면서 지구 대기환경문제로 발전하였다. 이에 따라 가맹국은 2000년까지 기준 년도에 대해 30 % 이상의 VOCs 배출량 감축을 목표로 했고 대부분 국가는 용제사용과 교통수단에서의 VOCs 배출저감에 초점을 두고 있다.

이러한 배경에서 VOCs 규제 및 관리는 미국과 유럽을 중심으로 발달되어 왔으며 미국이 가장 선도적인 역할을 하고 있고 일본에서도 지방조례로 1970년대부터 관리해 오고 있다. 미국과 유럽의 규제 및 관리는 정도의 차이는 있으나 근본적으로 같다고 볼 수 있으며 저감대책의 기본인식은 사전오염 예방차원의 VOCs 총량규제이다.

VOCs 배출은 각 나라의 경제 및 산업구조의 특성에 따라 달라질 수 있다. 예를 들어 유기용제 및 세정제를 많이 소비하는 산업구조 및 소비성향에서는 특별한 대책이 없는 한 VOCs 배출은 증가할 수밖에 없다. 미국과 유럽의 경우 자동차(주로 가솔린)와 용제사용에서의 VOCs 배출이 전체 배출의 80 % 가량으로 보고되고 있으며 우리나라의 경우도 유사한 배출비중을 나타내는 것으로 보고된 바 있다.

미국은 1950년대에 VOCs에 대해서 규제를 실시하였고 그 후 약 20년 후에 유럽에서 규제를 실시하였다. 우리나라는 1995년 12월 대기환경보전법 개정안에 VOCs 규제근거 법령을 제정한 후 2000년 VOCs 규제가 본격화되기까지 많은 발전과정을 겪었다. VOCs 관리는 대기환경규제지역인 수도권 대도시 지역의 오존오염 저감을 위해 출발하였으나 여천공단의 악취 및 주민 건강 피해의 민원발생으로 점차 건강 위해성 저감을 위한 관리로 변화되었다. 그



집 중 기 획 건물에서의 실내공기질 문제

간 추진내용을 요약하면 VOCs 배출시설 관리대상 지역은 여천, 울산, 미포 및 온산공단의 대기보전 특별 대책지역과 서울, 인천, 경기도 15개시의 대기환경 규제지역이다. 법 상으로 명시된 관리대상 VOCs는 품목별로 레이드 증기압, 오존생성능력, 인체유해성, 배출량 및 측정가능여부 등을 고려하여 총 37개 물질이 규제대상 물질 및 제품으로 고시되어 있다.

맺는말

현재 국내에서는 VOC에 대한 정확한 배출량 산정과 사업장별로 배출되는 VOC 물질의 성분에 대해

정확하게 파악하지 못하고 있는 실정이다. 따라서 국내에서도 정확한 VOC 배출량 산정을 위해 사업장별로 사용되는 용제의 종류, 사용량 등의 정확한 통계 자료를 확보하여야 하며, 이러한 통계자료에 근거한 배출기여도를 산출하여 주요 배출원에 대한 관리 및 기준 설정이 필요하다. 또 현재 시행중인 TRI의 대상업종과 보고대상물질을 확대하여 VOC 배출원에 대한 성분조성비를 추정할 수 있는 체계적인 자료수집과 분석이 필요하다고 사료된다. 또한 향후 배출시설별 규제대상물질별로 구체적인 장기적인 조사연구를 통하여 보다 효율적인 VOC관리방안이 검토되어야 한다고 사료된다. (●)