유해대기오염물질의 국내 배출실태

국립환경연구원 홍지형

1. 서론

산업화와 자동차 보급 확대 및 주변국가의 공업화에 따른 대기오염이 인간의 건강피해를 우려할 정도로 심각해지고 있으며 그 배출되는 물질도 다양하게 나타나고 있다.

대기오염이란 "대기중에 인위적으로 배출된 오염물질이 한가지 또는 그 이상 존재하여 오염물질의 양, 농도 및 지속시간이 어떤 지역의 불특정 다수인에게 불쾌감을 일으키거나 해당지역에 공중보건상 위해를 해치고, 인간이나 동,식물의 활동에 해를 주어 생활과 재산을 향유할 정당한 권리를 방해받는 상태"으로 정의할 수 있으며, 이러한 대기오염을 유발하는 물질은 매연, 먼지, 가스 및 악취 등으로 사람의 건강상 또는 재산상에 해를 미치거나 동,식물의 생육환경 등 자연환경에 악영향을 미치는 물질을 말하는데, 대기환경보전법에서는 이를 크게 가스상물질과 입자상물질로 구분하고 있다.

가스상물질은 연소·합성·분해시 발생하거나 물리적 성질에 의해서 발생되는 기체상의 물질로서 황산화물, 질소산화물, 일산화탄소 및 오존 등을 말하며, 입자상물질은 물질의 파쇄, 선별 등 기계적 처리 또는 연소·합성·분해시에 발생하는 고체상 또는 액체성의 미세한 물질을 말한다.

90년대 이후 아황산가스(SO_2), 먼지를 비롯한 일부 대기오염물질의 대기중 농도는 괄목할만한 수준으로 개선되었다. 그러나 오존(O_3) 등 일부 항목은 오염도가 매년 증가되고 있으며, 시정장애현상이 심화되어 국민들이 느끼는 체감오염도는 날로 증가하고 있는 실정이다.

SO_2, 먼지 등 오염물질의 발생원은 주로 발전소, 산업시설, 난방시

설 등 고정오염원(Stationary Source)으로서 그동안 청정연료보급정책의 추진에 따라 사용연료가 고황유에서 저황유 또는 청정연료로 대체되어 감에 따라 오염도가 대폭 감소하였다. 그러나 최근 자동차가 폭발적으로 증가하면서 질소산화물(NO_x) 및 휘발성유기화합물질(Volatile Organic Compounds), 그리고 미세먼지(PM10)의 배출량이 대폭 증가하여 도시지역의 O_3오염과 시정장애문제를 심화시키고 있다. 이와 함께 새로운 합성화합물질의 사용 증가 등에 따라 발암물질 등 인체에 유해한 미량의 유해화학물질의 대기중 농도가 증가하고 있으며, 이들 물질에 대한 관심이 점차 고조되고 있다.

이와 같이 우리나라의 대기오염현상은 저급연료의 사용에 기인하는 후진국 또는 개도국형에서, 자동차와 화학물질의 사용에 기인하는 선진국형으로 변화되어 가고 있다. 본고에서는 최근까지의 대기오염물질의 배출양상을 고찰하고, 이를 통해 우리나라가 안고있는 대기오염문제의 해결을 위한 노력이 어떤 방향으로 가야될 것인지를 함께 고민해 보고자 한다.

2. 대기오염물질 현황

가. 국내 대기오염물질 배출원 현황

대기오염물질을 발생시키는 원천은 너무나 다양하다. 황사와 같이 바람에 의해 토양의 흙먼지가 날려 대기오염을 유발할 수도 있고, 산불이나 화산에 의해 먼지나 매연이 발생할 수도 있는데 이렇게 인간의 활동과 관계없이 대기오염물질을 발생시키는 배출원을 자연적 발생원(Natural Source)이라 한다.

그러나 오늘날 크게 문제가 되고 있는 것은 이러한 자연적 발생원으로 인한 대기오염보다는 대부분 인간의 활동에서 비롯되는 인위적 배출원(Anthropogenic Source)이라고 할 수 있다. 인위적 발생원은 다시 점오염원(Point Source), 면오염원(Area Source), 선오염원(Line Source)으로 구분된다. 점오염원은 발전소나 대규모공장과 같이 하나의 시설이 대량의 오염물질을 배출하는 것을 말하며, 면오염원은 주택

과 같이 일정면적 내에 소규모 발생원이 다수가 모여 오염물질을 발생함으로써 해당지역 내에 오염문제를 발생시키는 것을 말하고, 선오염원은 자동차, 기차, 비행기, 선박 등과 같이 이동하면서 오염물질을 연속적으로 배출하는 것을 말한다.

점오염원인 공장에서 발생되는 대기오염물질은 암모니아, 일산화탄소, 염화수소, 이산화황, 질소산화물, 불화수소 등 할로겐화합물 및 중금속 등이며, 각 오염물질별 대표적인 배출업종은 다음과 같다.

- 암모니아(NH_3) : 비료공장, 암모니아 제조시설, 냉동시설 등
- 일산화탄소(CO) : 연소시설, 코크스 제조시설, 자동차 등
- 염화수소(HCl) : 비료공장, 도금시설, 염산제조 시설 등
- 이산화황(SO_2) : 연소보일러, 황산공장, 제련소 등
- 질소산화물(NOx) : 내연기관, 보일러, 비료공장 등
- 불화수소(HF) : 요업 공장, 유리공장, 알미늄 공장 등
- 비소(As) : 유리공장, 농약제조시설 등
- 카드뮴(Cd) : 전지 공장, 도금공장 등
- 크롬(Cr) : 도금공장, 염료제조시설, 인쇄시설 등
- 납(Pb) : 건전지 및 축전지 제조, 안료 제조시설 등

표 1. 우리 나라 대기환경보전법의 일반대기오염물질

1. 입자상물질	2. 브롬 및 그 화합물	3. 알루미늄 및 그 화합물	4. 바나듐 및 그 화합물
5. 망간화합물	6. 철 및 그 화합물	7. 아연 및 그 화합물	8. 셀렌 및 그 화합물
9. 안티몬 및 화합물	10. 주석 및 그 화합물	11. 텔루륨 및 그 화합물	12. 바륨 및 그 화합물
13. 일산화탄소	14. 암모니아	15. 질소산화물	16. 황산화물
17. 황화수소	18. 황화메틸	19. 이황화메틸	20. 메르캅탄류
21. 아민류	22. 사염화탄소	23. 이황화탄소	24. 탄화수소
25. 인 및 화합물	26. 붕소화합물	27. 아닐린	28. 벤젠
29. 스틸렌	30. 아크롤레인	31. 카드뮴 및 그 화합물	32. 시안화물
33. 납 및 화합물	34. 크롬 및 그 화합물	35. 비소 및 화합물	36. 수은 및 그 화합물
37. 구리 및 화합물	38. 염소 및 그 화합물	39. 불소화물	40. 석면
41. 니켈 및 화합물	42. 염화비닐	43. 디옥신	44. 페놀 및 그 화합물
45. 베릴륨 및 화합물	46. 프로필렌 옥사이드	47. 폴리크로리네이티드 비페닐	48. 클로로포름
49. 포름알데히드	50. 아세트알데히드	51. 벤지딘	52. 1-3 부타디엔

표 2. 우리나라의 특정대기유해물질

1. 카드뮴 및 화합물	2. 시안화수소	3. 납 및 그 화합물	4. 폴리크로리네이티드 비페닐
5. 크롬화합물	6. 비소 및 그 화합물	7. 수은 및 그 화합물	8. 프로필렌 옥사이드
9. 염소 및 염화수소	10. 불소화물	11. 석면	12. 니켈 및 그 화합물
13. 염화비닐	14. 디옥신	15. 페놀 및 그 화합물	16. 베릴륨 및 그 화합물
17. 벤젠	18. 사염화탄소	19. 이황화메틸	20. 아닐린
21. 클로로포름	22. 포름알데히드	23. 아세트 알데히드	24. 벤지딘
25. 1-3 부타디엔			

표 3. 우리나라의 배출허용기준 규제물질

순서	오 염 물 질	순서	오 염 물 질
가 스 상 물 질		14	페놀화합물 (C_6H_5OH로서)
1	암모니아	15	수은화합물 (Hg로서)
2	일산화탄소	16	비소화합물 (As로서)
3	염화수소	입 자 상 물 질	
4	염소	1	먼 지
5	황산화물 (SO_2로서)	2	카드뮴화합물 (Cd로서)
6	질소산화물 (NO_2로서)	3	납화합물 (Pb로서)
7	이황화탄소	4	크롬화합물 (Cr로서)
8	포름알데히드	5	구리화합물 (Cu로서)
9	황화수소	6	니켈 및 그 화합물
10	불소화합물 (F로서)	7	아연화합물 (Zn로서)
11	시안화수소	8	비산먼지
12	브롬화합물 (Br로서)	9	매 연
13	벤젠화합물 (C_6H_6로서)		

※ 2000년 법개정시 염화비닐 및 탄화수소 추가 예정

우리나라에서는 이러한 대기오염물질을 배출하는 사업장을 연간 연료사용량에 따라 1종에서 5종 사업장으로 구분하고 있다. 대기배출업소를 연료 사용량에 따라 구분하는 이유는 대기오염물질의 발생이 주로 연료의 소비과정에서 나타나므로 연료를 다량으로 소비하는 사업장일수록 대기오염물질 배출량도 많기 때문이다.

1998년말 현재 전국의 총 배출업소수는 30,865개소로 표 1과 같다. 표에서 보는 바와 같이 대기오염물질 배출업체의 상당부분이 4, 5종 사업장으로 이들이 차지하는 비중은 전체의 94.7%에 달하며 3종 이상의 대규모 배출업체는 전체사업장의 5.3% 정도에 불과하다.

연도별 배출업소수는 1995년 총 28,801개소에서 1996년에는 31,229개소, 1997년 31,855개소로 증가하는 등 지속적으로 증가해 왔으나, IMF이후 산업활동이 위축된 결과 1998년에는 총 30,865개소로 전년에 비하여 약간 감소하였으나 99년이후 다시 큰 폭으로 증가하고 있다.

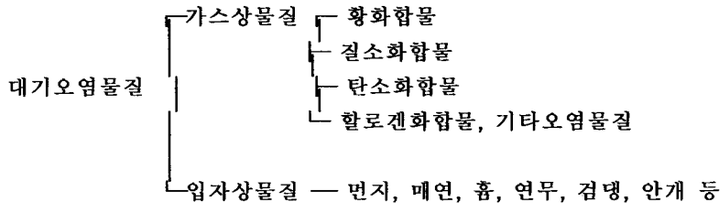

그림 1. 대기오염물질의 물리적 성상에 따른 분류

표 4. 우리 나라 대기배출업소 분포 현황 (1998년 기준)

종별 / 시도,환경관리청	계	1종	2종	3종	4종	5종
총 사업장 수	30,865	669	1,178	1,245	4,814	22,959
시·도 관할 업소	23,819	301	608	747	3,469	18,669
지방환경관리청 관할 업소	7,046	368	570	498	1,320	4,290

나. 우리나라 주요도시의 대기질 현황

우리 나라 대도시의 대기질은 과거 10여년에 걸쳐 많은 변화가 있었다. 그림에서 보는 바와 같이 SO_2, 일산화탄소(CO), 먼지 등의 오염도는 크게 감소하였으며, 광역시급 이상도시의 연평균오염도는 환경기준이하로 감소되었다. 반면 O_3오염도는 계속 증가추세에 있으며, NO_2의 경우에도 기준이내이기는 하지만 약간 증가하고 있는 추세에 있다.

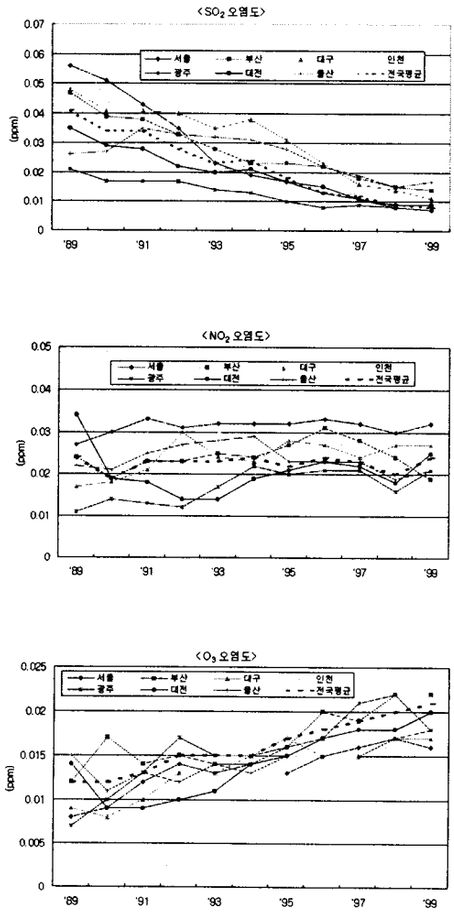

그림 2 대도시의 연평균 대기오염도 추세

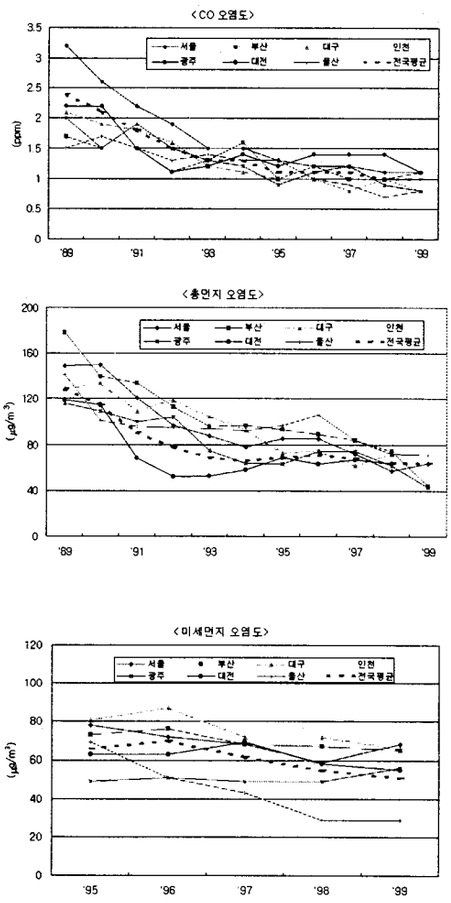

그림 3 대도시의 연평균 대기오염도 추세

다. 연료사용 통계에 의한 대기오염물질의 배출량

어느나라나 대기오염 정책을 수행하기위해서는 그나라에서 배출되는 오염물질의 배출통계를 필요로 한다. 국립환경연구원에서는 이러한 배출량 통계를 매년 산정하고 있는데 그 방식은 2가지로 크게 나뉘어 진다. 첫째는 top-down 방식의 배출량 추정방법으로 우리나라 각 부분별 연료사용 통계를 이용하여 배출량을 산정하는 방법이다.

두 번째는 bottom-up 방식으로 모든 배출원에 대한 목록(emission inventory)데이터베이스를 이용하여 산정하는 방법이다. 본 고에서는 첫째의 방법을 이용하여 추정한 결과를 중심으로 우리나라의 오염배출 실태를 대략적으로 나타내보고자 한다.

연료통계를 이용한 방법에서는 연료별 오염물질배출계수를 이용하여 이론적으로 계산하는 방법을 적용하는데 우리나라는 국립환경연구원에서 개발한 배출계수와 미국 환경보호처(EPA)에서 발표한 배출계수(AP-42)를 사용하여 대기오염물질 배출량을 추정하고 있다.

1) 산정방법

□ 고정배출원

○ 유류 :

배출량(톤/년) = 배출계수(kg/kℓ) × 년간연료사용량(kℓ/년) × 10^{-3}(톤/kg)

○ 석탄 :

배출량(톤/년) = 배출계수(kg/톤) × 년간연료사용량(톤/년) × 10^{-3}(톤/kg)

○ 가스 :

배출량(톤/년) = 배출계수(kg/10^{3}㎥, kg/kℓ) × 년간연료사용량
(10^{3}㎥/년, kℓ/년) × 10^{-3}(톤/kg)

□ 이동배출원

○ 먼지, CO, HC, NOx :

배출량(톤/년) = 자동차 등록대수(대) × 차종별 일일주행거리(㎞/대·일)
× 배출계수(g/㎞) × 365일/년 × 10^{-6}(톤/g)

○ SO_2 :

- 휘발유

배출량(톤/년) = 연료소비량(ℓ/일) × 연료비중(0.75) ×휘발유중 황함량*
÷ 100 × 2 × 365일/년 × 10^{-3}(톤/kg)

○ 경유

배출량(톤/년) = 연료소비량(ℓ/일) × 연료비중(0.85) ×경유중 황함량**

÷ 100 × 2 × 365일/년 × 10^{-3}(톤/kg)

※ 참고 휘발유중 황함량 : 0.005%, 경유중 황함량 : 0.04%

2) 연료 현황자료

1998년도 국내 연료사용은 유류 55,678천kL(전년 77,571천kL)로 '97년 기준 28.2%의 감소를 보였고, 석탄류 55,180천톤(전년 52,724천톤)으로 전년대비 4.7%의 증가를, 가스류의 경우 14,619천톤(전년 15,865천톤)으로 7.9%의 감소를 보였으며, 이는 지난 1998년도에 IMF를 겪으면서 산업경기가 급격히 냉각됨에 따라 산업활동의 주체가 되는 유류의 사용량이 급감하였기 때문이며, 현재는 IMF이전의 증가율을 회복하고 있다.

3) 연료통계에 의한 오염배출량 추정결과

연료사용에 따른 1998년도 대기오염물질 총 배출량은 3,768천톤(1997년 4,365천톤)으로 전년대비 596천톤의 배출감소를 보였으며, 지역별로는 경기가 434천톤(1997년 550천톤), 경남이 426천톤(1997년 609천톤), 전남이 418천톤(1997년 475천톤), 경북이 407천톤(1997년 450천톤), 충남이 444천톤(1997년 389천톤), 서울이 388천톤(1997년 334천톤)의 순으로 나타남.

오염물질별로는 아황산가스 1,146천톤(30.4%), 질소산화물 1,084천톤(28.8%), 일산화탄소 977천톤(25.9%), 먼지 420천톤(11.1%), 탄화수소 141천톤(3.8%) 순으로 나타남.

연료별 대기오염 배출 기여량은 유류가 2,184천톤(58%), 석탄이 1,295천톤(34%), 가스가 290천톤(8%)순으로 나타나 1997년과 비교하여 유류는 8% 감소한 반면, 가스 및 석탄은 각각 3% 및 3%의 증가를 보임.

연료의 용도별 배출량은 수송부분이 1,916천톤(51%), 산업부분

이 987천톤(26%), 발전부분이 684천톤(18%), 난방부분이 182천톤(5%) 이었음.

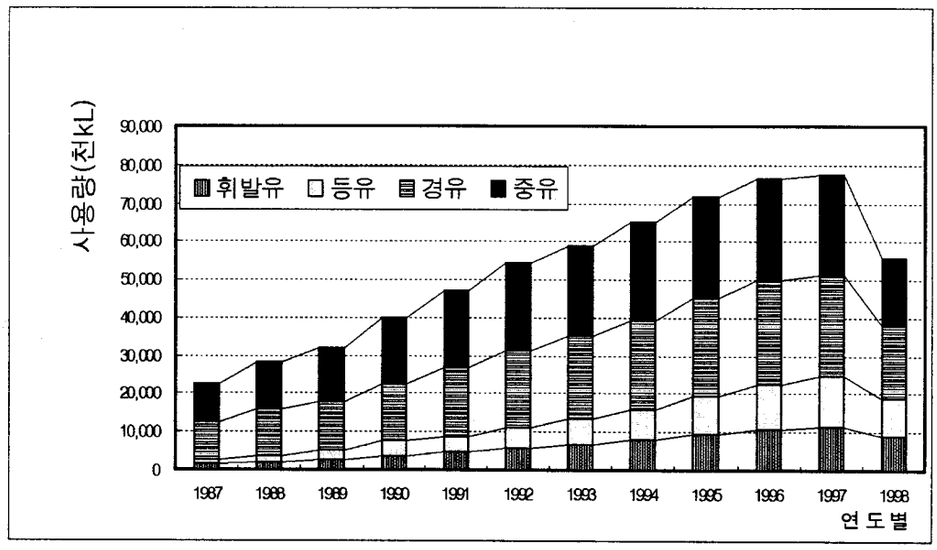

그림4 . 연도별 유류 사용량 변화(전국)

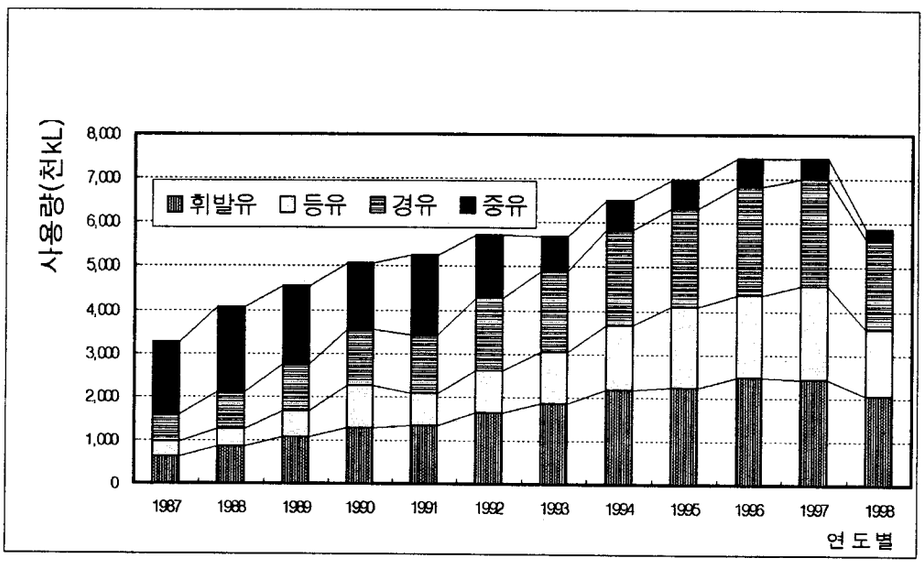

그림5. 연도별 유류 사용량 변화(서울)

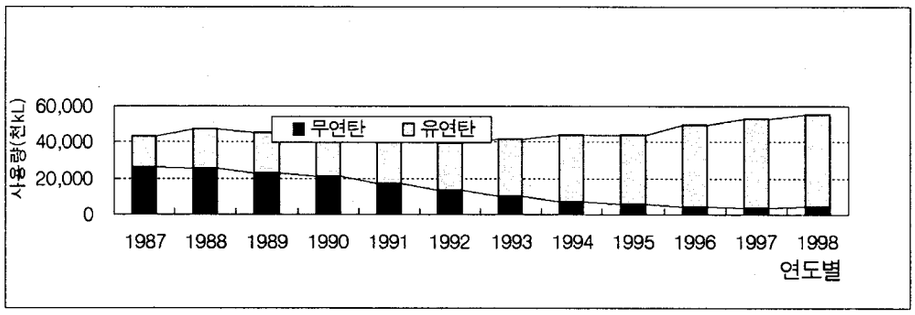

그림 6. 연도별 석탄 사용량 변화(전국)

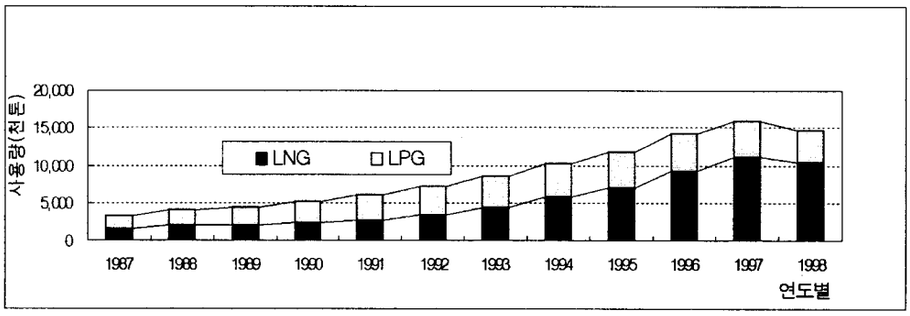

그림 7. 연도별 가스 사용량 변화(전국)

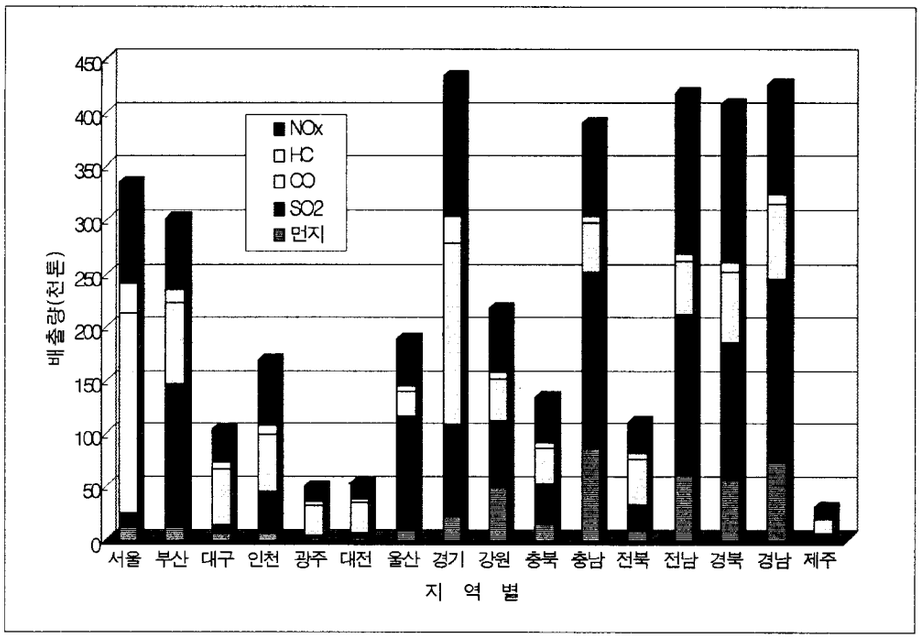

그림 8. 지역별 오염배출 현황

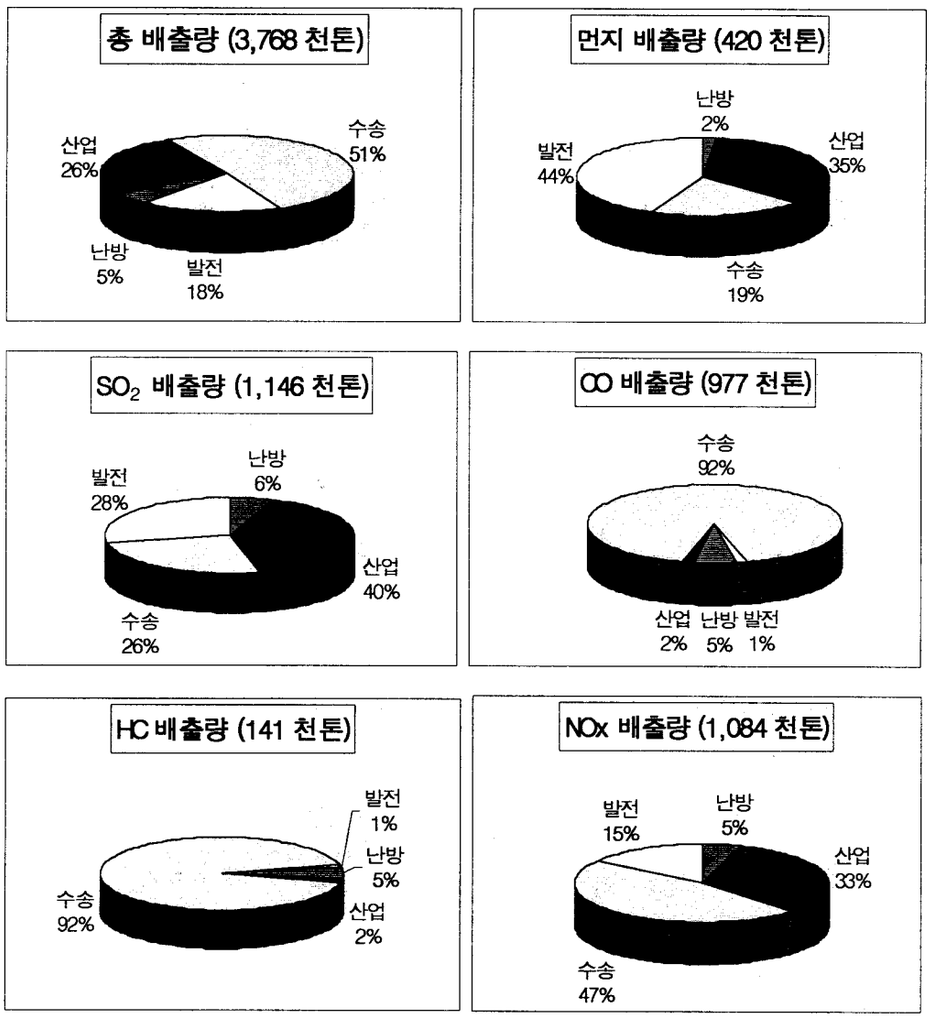

그림 9. 부문별 오염배출량

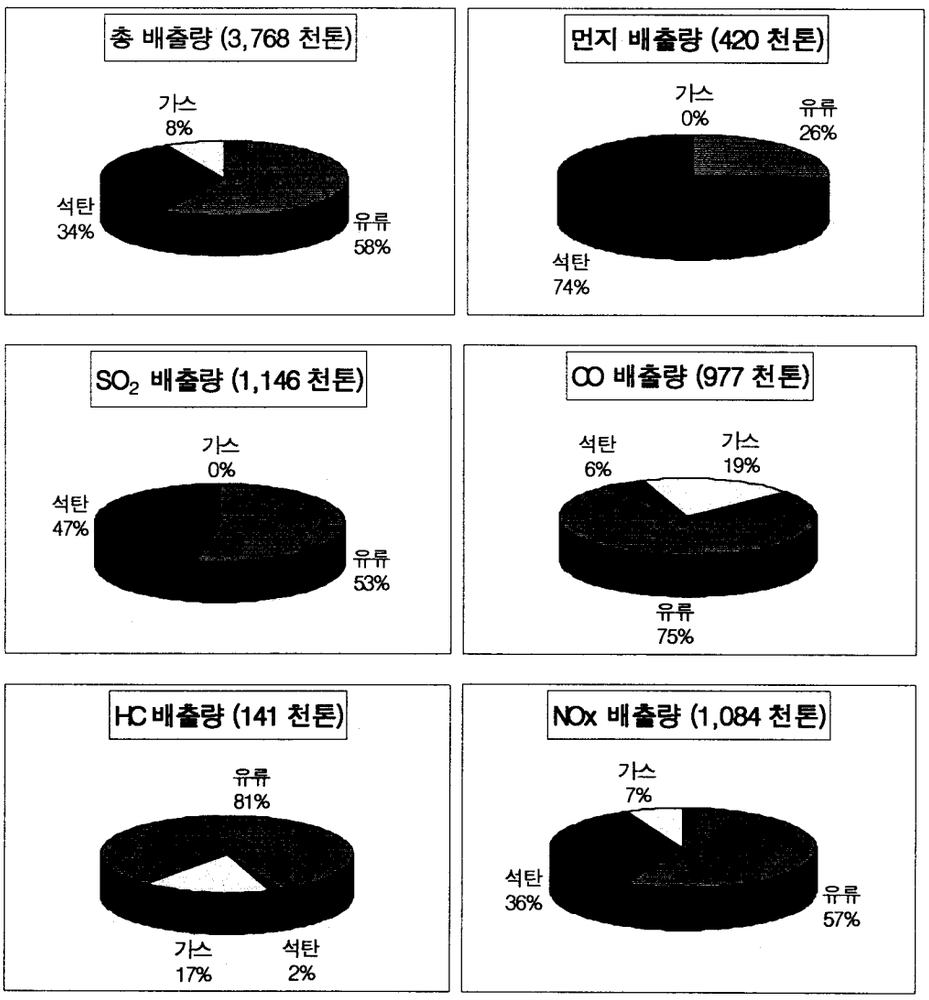

그림 10. 연료별 오염배출량

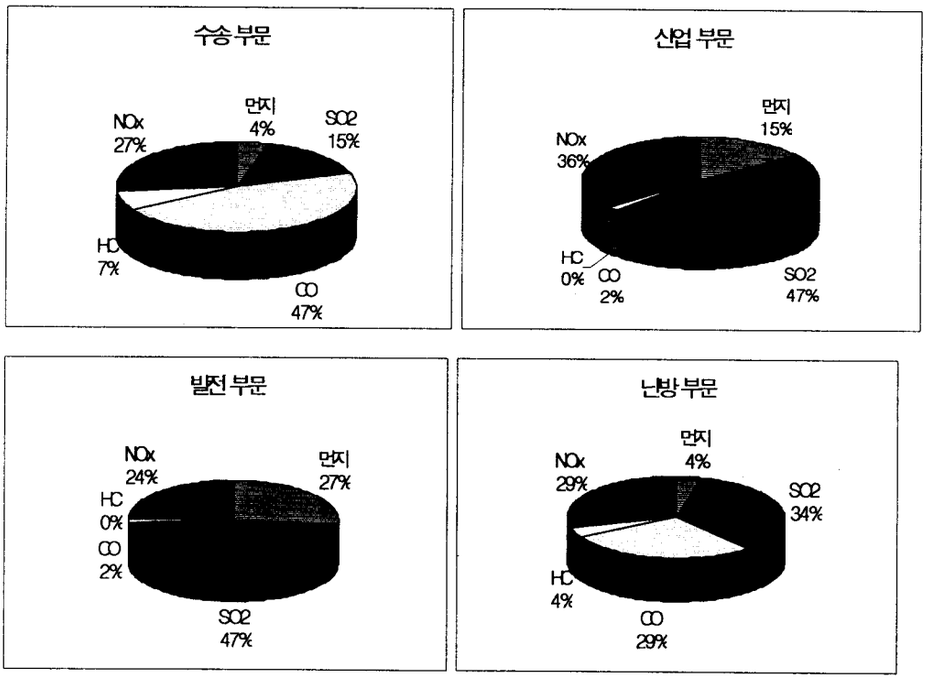

그림 11. 각 분야별 오염물질 배출기여율

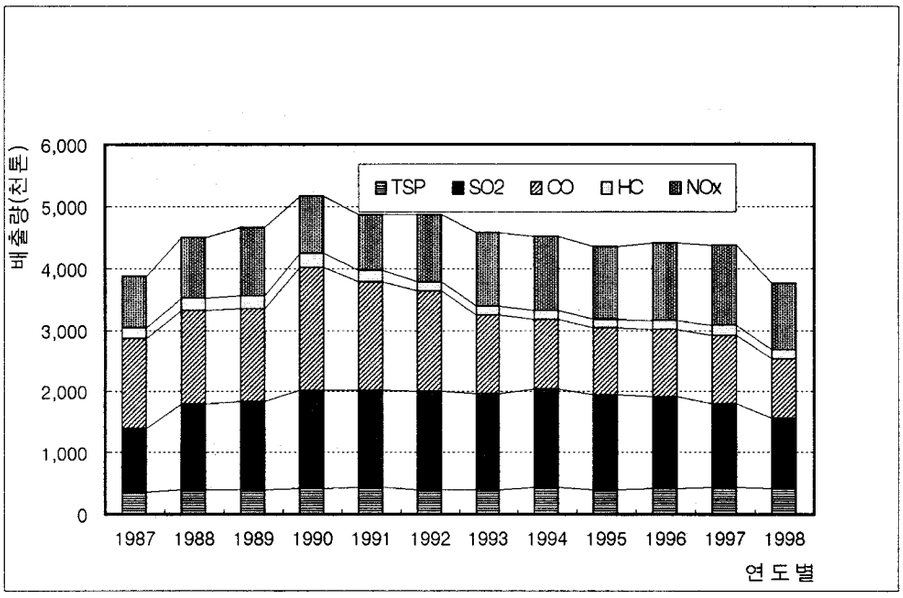

그림 12. 연도별 오염물질 배출량 변화(전국)

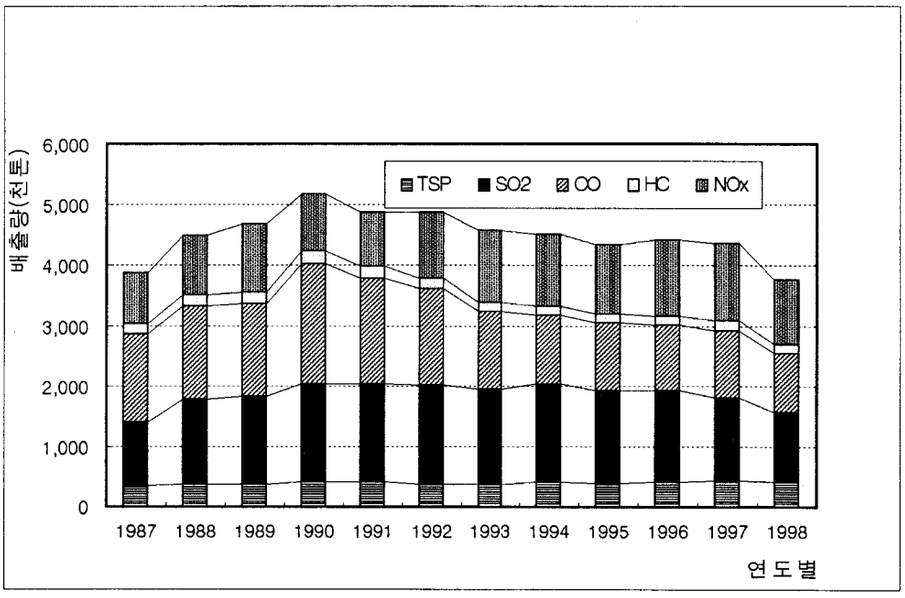

그림 13. 연도별 오염물질 배출량 변화(서울)

라. 휘발성유기화합물질의 배출량

1) 정의

대기환경보전법에서 정하고 있는 VOC 규제대상 물질은 총 31종으로 표 5와 같다. (2000년 현재 10종의 물질을 확대검토 중)

표 5. 현행 국내 휘발성유기화합물질

번호	물질 및 제품명	번호	물질 및 제품명
1	1,1,1-트리클로로에탄	17	아크롤레인
2	1,2-디클로로에탄(에틸렌 디클로라이드)	18	아크릴로니트릴
3	1,3-부타디엔	19	에틸렌
4	1-부텐, 2-부텐	20	에틸알콜(공업용에 한함)
5	납사**	21	엠티비이(MTBE)
6	디메틸 아민	22	원유**
7	디에틸 아민	23	이소프로필알콜
8	디클로로메탄	24	카본 테트라클로라이드
9	메탄올	25	클로로포름
10	메틸 에틸 케톤 (MEK)	26	트리클로로에틸렌
11	벤젠	27	포름알데히드
12	부탄	28	프로필렌
13	사이클로헥산	29	프로필렌 옥사이드
14	아세트알데히드	30	휘발유**
15	아세틸렌	31	n-헥산
16	아세틸렌 디클로라이드		

*** 휘발성유기화합물질을 발생시키는 제품**

또한 유해화학물질관리법에서 조사하고 있는 독성물질목록(TRI, toxic release inventory)은 총 80종으로 표 6과 같다.

표 6. 국내 TRI의 조사대상물질(1단계)

	물질명		물질명
1	1,1,1-트리클로로에탄	41	아크리나트린
2	1,2-디브로모에탄	42	아크릴로니트릴
3	1,2-디클로로에탄(에틸렌 디클로라이드)	43	알드린
4	1,2-디클로로에탄(에틸렌 디클로라이드)	44	알루미늄 포스하이드
5	1,3-디메틸 벤젠(m-자일렌)	45	암모니아
6	1,3-디시아노테트라클로로벤젠	46	에틸 벤젠
7	1,3-부타디엔	47	에틸 아크릴레이트
8	1,4-디메틸 벤젠(p-자일렌)	48	에틸렌 글리콜
9	1-클로로-2,3-에폭시프로판	49	에틸렌 트리클로라이드
10	2,4-디니트로페놀	50	엔도설판
11	2-프로펜-1-올	51	엔토프로포스
12	2-프로펜아미드	52	자일렌
13	2-프로핀-1-올	53	카본 디설파이드
14	니트로벤젠	54	카본 테트라클로라이드
15	니트릴 산	55	캅탄
16	디메토에이트	56	크레졸
17	디메틸 설페이트	57	클로단
18	디메틸 아민	58	클로로포름
19	디에틸 설페이트	59	클로로피크린
20	디에틸 아민	60	클로린
21	디엘드린	61	톨루엔
22	디클로로메탄	62	트리부틸틴 옥사이드
23	메탄올	63	트리플라린
24	메틸 보미드	64	파라쿼트 솔트
25	메틸 에틸 케톤 (MEK)	65	파라티온
26	메틸 클로라이드	66	파이락로포스
27	메틸렌 클로라이드	67	퍼클로로에틸렌
28	모노클로로아세틱 엑시드	68	페놀
29	몰리네이트	69	펜타클로로프놀
30	벤젠	70	펜피록시메이트
31	부틸 아크릴레이트	71	포름알데히드
32	브로민	72	포스포러스
33	비닐 클로라이드	73	포스포릭 엑시드
34	설퍼릭 엑시드	74	폴펫
35	스티렌	75	프로필렌 옥사이드
36	아닐린	76	프루아지남
37	아르세닉 펜톡사이드	77	하이드라진
38	아세트알데히드	78	하이드로클로릭 엑시드
39	아세틸렌	79	하이드로플로릭 엑시드
40	아크롤레인	80	헵타클로르

2) 선진국의 배출현황

유럽은 1990년 CORINAIR90 inventory(28 개국)를 통해 전체 오염물질중 NMVOC 가 차지하는비율이 상당히 큰 것으로 평가. 이중 페인트사용으로 야기된 NMVOC의 발생량이 대부분을 차지하는 것으로 추정

3) 국내 배출현황

국내의 휘발성유기화합물질 배출에 대하여 아직까지 정확한 통계를 확보하지 못하고 있으며 96년 국립환경연구원에서 추산한 결과를 표 7에 나타내었다.

표 7. 국내 휘발성 유기화합물질 (VOC) 배출량

자동차운행	**기관배출**	**증발배출**	**소계**
배출량(톤)	179,140	34,143	213,283
배출비율(%)	29.3	5.6	34.9
주유소	**stage Ⅰ**	**stage Ⅱ**	**소계**
배출량(톤)	14,480	17,722	32,202
배출비율(%)	2.4	2.9	5.3
도장산업	**도료제조**	**도장과정**	**소계**
배출량(톤)	28,392	254,143	282,535
배출비율(%)	4.6	41.6	46.2
인쇄	**잉크제조**	**인쇄과정**	**소계**
배출량(톤)	3,416	18,218	21,634
배출비율(%)	0.6	3	3.6
세탁시설업소	**용제사용**		
배출량(톤)	13,521		
배출비율(%)	2.2		
도로포장	**커트백 아스팔트**		
배출량(톤)	19,784		
배출비율(%)	3.2		
유류저장 및 출하시설	**저장시설**	**출하시설**	**소계**
배출량(톤)	6,511	22,310	28,321
배출비율(%)	1	3.6	4.6
합계			
배출량(톤)	611,280		
배출비율(%)	100		

* 자료 : 환경부, 1997
* stage Ⅰ : 가솔린 운반차량에서 주유소 지하 저장탱크로 공급하는 과정에서 주로 배출
* stage Ⅱ : 자동차 급유과정에서 주로 배출

3. 결언

지금까지 우리나라의 대기오염물질 배출실태를 통계자료를 통해 알아보았다. 이러한 자료에서 나온 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 우리 나라의 도시 대기중 SO_2, 먼지, CO 등의 오염도는 저황유 및 청정연료의 보급 확대에 따라 획기적으로 개선되었다. 반면 O_3 오염도는 자동차 등에서 배출되는 NO_x 및 VOC의 증가에 따라 계속 증가하고 있으며, NO_2의 경우에도 다소 증가하는 추세로 이에 대한 국가적인 대비가 필요하다.
- 현재까지의 에너지사용량 통계를 고려할 때 장래 10년 후 대기질을 예측해 보면 에너지소비량의 지속적인 증가로 SO_2를 비롯한 모든 오염물질의 오염도가 현재보다 약 40~50% 정도 증가할 것으로 전망된다. 따라서 현재 환경기준을 달성하고 있는 SO_2, PM10 등도 기준초과지역이 발생할 가능성이 높고, 특히 O_3 오염도 등은 오염현상이 심화될 것으로 예상되기 때문에 환경기준물질뿐만 아니라 휘발성 유기화합물질 등 오존생성과 관련된 물질을 효과적으로 억제할 수 있는 정책의 수행과 저감기술의 개발이 요구된다고 하겠다.