에너지 수급에 따른 대기오염과 그 관리 대책

정 용
연세대학교 환경공해연구소

●1943년생.
●1965년 서울대 약학대학을 졸업하였으며, 환경영향 및 환경유해성평가분야에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

에너지의 사용은 곧 인류의 역사와 함께 시작되었으며 그 시대의 기술진보와 산업구조의 변화에 따라 발전하여 왔다.

중세까지는 주로 수력, 풍력 등이 사용되었으며 증기기관의 발명으로 목재의 수요가 급격히 증가하여 이로 인한 산림의 황폐는 새로운 에너지원을 필요로 하게 되었다. 산업혁명시기부터는 석탄이 새로운 에너지원으로 등장하게 되었고, 20세기에 들어와, 석유를 연료로 하는 내연기관의 개발과 자동차의 보급은 석유를 새로운 에너지원으로 등장시켜 서서히 석탄 에너지원의 대체 에너지원이 되었다.

이처럼 사회의 산업화에 따라서 에너지 사용량 특히 화석연료의 사용량이 크게 늘어 이의 연소로 인한 대기오염이 커다란 사회문제로 대두되게 되었다.

1948년에 일어난 벨기에 뮤즈벨리 사건이나 1950년에 발생한 멕시코의 포자리카 사건, 1984년 인도의 보팔시 사건들은 공장에서의 배출물질이나 오염물이 누출되어 인근 주민 수십명이 사망하거나 고통을 당한 대기오염 사건이다.[1]

1952년 영국 런던 사건은 수 일 간에 걸쳐 기온역전현상이 일어나고 아황산가스나 분진농도가 평상시에 비해 최고 7~9배 높게 나타나서 평균 사망자보다 3,000~4,000명의 사망자를 더 낸 사건이다.[2]

또한 1954년 7월에 미국 로스엔젤레스에서는 자동차의 화석연료 연소시 배출되는 올레핀(olefin)계 탄화수소, 질소산화물, 황산화물 등과 자외선에 의한 반응으로 발생한 광화학 스모그 사건이 일어났다.

이들 사건의 공통점은 대기중에 배출된 오염물질의 확산을 방해한 기온역전과 같은 기상조건이 한동안 계속되었기 때문에 대기오염물질의 확산이 일어나지 않아서 발생된 대기오염의 사례들이다.

오늘날 전 세계적으로 화석연료의 사용으로 인한 온실효과(greenhouse-effect)로 야기되는 지구온난화현상이 관심과 우려의 촛점이 되고 있다.

1980년부터 1990년까지 10년 동안 온실효과에 대한 주요 원인 기체들의 기여도를 보면 이산화탄소(CO_2) 55%, 메탄(CH_4) 15%, 염화불화탄소(CFC-11과 CFC-12) 24% 그리고 산화질소(N_2O) 6%로 추산된다.[3]

이들의 대기중 농도도 급격히 증가하여 이산화탄소의 경우 지난 10년 간의 농도 변화는 1850년부터 1950년까지의 100년 간의 변화와 맞먹는다.

만약 이 같은 추세가 계속된다면 이산화탄소

의 농도는 25년 내에 2배로 증가될 것이다.

이산화탄소는 발전, 산업, 상업활동 및 수송에 사용되는 화석연료의 연소로부터 75% 이상 배출되는데 세계 인구의 4.8%를 차지하는 미국이 화석연료로부터 발생되는 이산화탄소의 21%를 배출하고 있는 반면 세계 인구의 15.8%를 점하는 인도는 지구 전체 CO_2 배출량의 단지 45%만을 배출하고 있다. 각국의 1인당 CO_2 배출량을 보면 1988년 현재 미국이 5.3톤으로 가장 많고 우리나라는 스페인 등과 함께 1.5톤에 조금 못 미치는 수준이며 전 세계 평균 1인당 1.2톤을 상회하고 있다.

이처럼 선·후진국 간에 CO_2 배출량의 차이가 크기 때문에 앞으로 지구 온난화를 방지하기 위하여 에너지 소비 및 화석연료의 사용을 제한하자는 선진국들의 제안에 대해 저 개발국가들과 의견의 충돌이 일어나고 있다.

우리나라도 경제개발 5개년 계획에 따른 산업화구조로의 사회변화를 꾀하기 시작하였고 이들의 형태는 다에너지 소모성 산업구조가 대부분이었다.

특히 인구의 대도시 집중현상, 지역적 편중이 심한 공업단지 조성, 에너지원의 편중화 추세에 따라서 대기오염도는 날로 심화되어 가고 있다.

따라서 우리나라에서도 세계적인 환경오염피해 현상들의 축소판을 자주 접하기에 이르렀고 이의 감소와 피해의 최소화를 위한 대책이 시급한 실정에 이르렀다.

이 글에서는 주로 우리나라의 에너지 수급과 대기오염과의 관계와 이를 위한 대책 부분에 대하여 다루어 보고자 한다.

2. 에너지 소비현황 및 추이

2.1 주요에너지 소비 추이

1973년 석유파동 이후 계속하여 세계 에너지 동향은 많은 변화를 겪어 오고 있다. 그러나 세계 각국의 산업구조는 대부분 석유의존도가

표 1 국가 생산고 대비 석유소비, '89~'90년[4]

국 가	석유 사용량	석유 의존도
	(100만 배럴/1일)	(100만 배럴/GNP 10억달러)
미 국	16.20	1.11
일 본	5.25	0.66
서 독	2.40	0.59
중 국	2.28	1.95
인디아	1.04	1.48
한 국	0.81	1.41
브라질	1.20	1.25

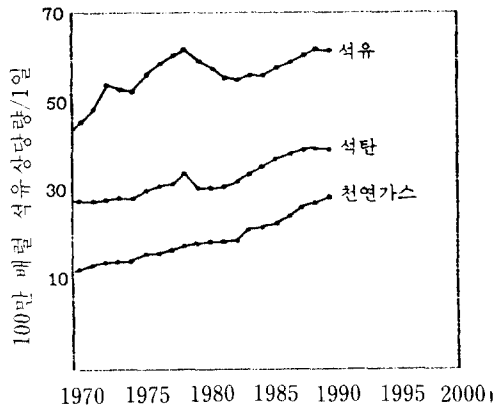

그림 1 세계 석유, 석탄 및 천연가스 사용량(1970년~1990년)

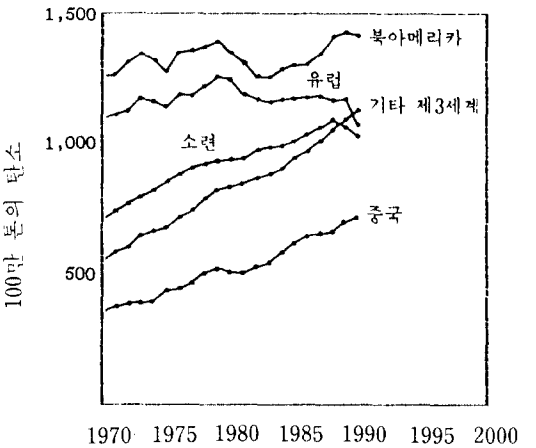

그림 2 화석연료로부터의 탄소방출량(일부지역)

높은 산업을 주로 고집하고 있을 뿐 이에 대한 대책을 세우고 있는 나라는 별로 없다. 표 1은 1989년부터 1990년까지 각국의 국가 생산고 대비 석유소비량을 나타낸다.

따라서 그림 1과 같이 연료별 사용량이 일시적인 변화 이외에는 계속적인 증가추세를 보이고 있고, 그림 2에 나타낸 바와 같이 이에 따른 탄산가스의 방출량도 계속 늘어만 가고 있다.

우리나라의 총에너지 소비량은 지난 1965년 1차 에너지 1,201만 2천 TOE 최종에너지 1,122만 7천 TOE이던 것이 1980년 1차에너지 4,391만 1천 TOE 최종에너지 3,759만 7천 TOE로, 다시 1990년에는 1차에너지 9,319만 2천 TOE 최종에너지 7,503만 2천 TOE로 10년 동안 2배 가량의 증가를 보였다.

여기서 1차 에너지란 오랜 세월 동안 자연의 역학적인 절차의 반복으로 형성된 천연 상태의 에너지로서, 에너지원 중 직접 에너지로 사용할 수 있는 것으로 일정한 생산 전환 과정을 거쳐야 에너지로 사용되며, 최종 에너지는 최종 소비 부문의 에너지 이용 설비에 알맞은 형태로 사용되는 에너지를 말한다.

한편 1인당 총에너지 소비량(per capita energy)은 표 2에 나타낸 바와 같이 1965년 0.42 TOE에서 1990년엔 2.17TOE로 증가하여 1인당 국민총생산(per capita GNP)의 증가추세와 비례하여 증가했다.

1차 에너지별 구성비를 보면 1965년에는 석탄이 1차 에너지 중 43.6%로 가장 비중이 높았고 신탄(fire wood)이 42.8% 그리고 석유 12.1%의 순이었으나 1990년에는 석유 53.8% 석탄 26.2% 원자력 14.2% 그리고 신탄은 0.9%에 불과했다.

2.2 부문별 에너지 사용량

우리나라에서 사용되는 에너지는 용도에 따라 산업용, 가정·상업용, 수송용, 공공·기타용으로 분류하고 있다. 최종 에너지의 부문별 소비 추이는 표 3과 같으며 에너지 사용량은

표 2 주요 에너지 소비추이[5]

	총에너지 소비량 (100TOE)		1차 에너지원별 소비량(1000TOE) 및 구성비 추이(%)				1인당 총에너지 소비량 per capita Energy(TOE)	1인당 국민총생산 per capita GNP(dollars)
	1차	2차	석탄	석유	원자력	신탄		
1965	12,012	11,227	5,238 (43.6)	1,455 (12.1)	—	5,142 (42.8)	0.42	115
1970	19,678	17,882	5,829 (29.6)	9,293 (47.2)	—	4,251 (21.6)	0.61	242
1975	27,553	23,424	8,075 (29.3)	15,637 (56.8)	—	3420 (12.4)	0.78	532
1980	43,911	37,597	13,199 (30.1)	26,860 (61.1)	869 (2.0)	2,517 (5.7)	1.15	1,481
1985	56,296	46,998	22,022 (39.1)	27,142 (48.2)	4,186 (7.4)	2,031 (3.6)	1.38	2,194
1990	93,192	75,032	24,385 (26.2)	50,175 (53.8)	13,222 (14.2)	797 (0.9)	2.17	5,569

표 3 최종에너지 부문별 소비구조[5]

	계	산업	가정·상업	수송	공공·기타
1978	32,418	13,097	13,044	4,405	1,872
1982	38,711	17,354	15,197	4,215	1,945
1985	46,998	20,014	18,180	6,707	2,096
1988	60,970	28,200	19,638	10,747	2,385
1990	75,032	36,150	21,897	14,173	2,811

(단위 : 1,000TOE)

산업부문이 가장 많고 그 다음이 가정·상업, 수송, 공공·기타의 순이다.

3. 환경오염실태

3.1 오염물질 배출현황 및 추이

(1) 연도별 대기오염물질 배출량

1984년부터 1990년까지 연료사용량에 따른 주요 대기오염물질의 배출량을 추정하여 보면 표 4와 같다. 각 항목별로 보면 오염물질 발생량은 연도별로 계속 증가 추세에 있으며 탄소수소류는 1984년 9만 6천 톤에서 1990년에는 22만 1천 톤으로 가장 큰 증가폭을 보이고 있다.

(2) 배출원별 대기오염물질 배출량

1990년 현재 전국 및 서울의 배출원별 오염배출량은 표 5와 같다. 아황산가스 및 분진의 경우 산업부문에서 배출되는 양이 가장 많은 반면 탄화수소, 일산화탄소 및 질소산화물은 수송부문에서 가장 많이 배출되고 있는데 이들은 주로 자동차의 연소에서 발생되는 오염물질들이기 때문이다.

(3) 자동차 오염물질 배출량

1990년 현재 전국의 자동차 보유대수와 이들에서 발생되는 오염물질 배출량은 표 6과 같다. 대기오염물질의 지표적인 항목은 아황산가스와 총부유분진은 대부분 경유자동차에서 발생되고 있고 또한 질소산화물도 많은 양이 경유자동차에서 발생되고 있다. 단지 일산화탄소와 탄화수소류는 휘발유자동차의 발생량이 다소 큰 것으로 계산되었다.

3.2 대기오염 현황 및 추이

우리나라의 주요 도시별 대기오염도를 환경기준 항목별로 보면 다음과 같다.

(1) 아황산가스(SO_2)

표 7에 나타낸 연도별 오염도는 지역별로 다소의 차이를 보이나 서울은 연평균 환경기준인 0.05ppm를 넘고 있으며 다른 지역은 기준을 밑도는 수준이다. 특히 서울, 부산, 대구의 아황산가스농도가 높게 나타났다.

(2) 질소산화물(NO_x)

표 8에 나타낸 질소산화물의 측정결과는 환

표 4 연도별 대기오염물질 배출량 추정치[6]

	SO_2		CO		HC		NO_2		TSP	
	전 국	서 울	전 국	서 울	전 국	서 울	전 국	서 울	전 국	서 울
1984	1,226	169	1,330	445	96	28	775	149	274	50
1985	1,352	162	1,361	450	137	32	723	158	342	52
1986	1,241	168	1,449	514	146	35	782	172	342	54
1987	1,041	172	1,479	508	162	37	937	174	352	53
1988	1,401	177	1,476	536	196	45	876	110	390	55
1989	1,445	151	1,527	482	191	39	1,121	219	385	44
1990	1,611	138	1,991	640	221	52	926	128	420	49

표 5 배출원별 대기오염물질 배출량(1990년) (단위 : 톤/년)

구 분			합 계	SO_2	TSP	HC	CO	NO_2
전국	계		5,169,119 (100%)	1,610,960 (100%)	420,318 (100%)	220,711 (100%)	1,991,065 (100%)	926,065 (100%)
	난 방		1,379,832 (26.7)	336,481 (20.9)	101,330 (24.1)	27,431 (12.4)	856,222 (43.0)	58,368 (6.3)
	산 업		1,248,869 (24.2)	805,605 (50.5)	174,671 (41.6)	37,416 (17.0)	27,984 (1.4)	203,193 (21.3)
	발 전		496,756 (9.6)	279,967 (17.4)	67,037 (15.9)	12,786 (5.8)	7,858 (0.4)	129,108 (14.0)
	수송	소 계	2,043,662 (39.5)	188,307 (11.7)	77,280 (18.4)	43,078 (64.8)	1,099,001 (55.2)	535,396 (57.8)
		자동차	1,751,362 (33.9)	76,800 (4.8)	66,000 (15.9)	132,436 (60.0)	1,083,055 (53.4)	412,182 (44.5)
		기 타	292,300 (5.6)	112,107 (6.9)	10,391 (2.5)	10,642	35,946 (1.8)	123,214 (13.3)
서울	계		1,007,101 (100%)	138,035 (100%)	48,337 (100%)	52,106 (100%)	639,600 (100%)	128,423 (100%)
	난 방		437,000 (43.5)	97,513 (70.7)	32,544 (66.5)	8,734 (16.3)	282,042 (44.1)	16,874 (13.1)
	산 업		29,273 (2.9)	20,301 (14.7)	1,544 (3.2)	327 (0.6)	1,689 (0.3)	5,412 (4.2)
	발 전		10,263 (1.0)	3,063 (2.2)	398 (0.8)	65 (0.1)	329 (0.1)	6,408 (5.0)
	수송	소 계	529,858 (52.6)	17,158 (12.4)	14,451 (29.5)	42,980 (82.5)	355,540 (55.5)	99,729 (77.7)
		자동차	526,044 (52.2)	16,969 (12.3)	14,379 (29.4)	42,752 (82.1)	354,754 (55.4)	97,130 (75.7)
		기 타	3,814 (0.4)	189 (0.1)	72 (0.1)	228 (0.4)	786 (0.1)	2,539 (2.0)

*( )내는 배출 비율임.

경기준보다는 다소 낮은 농도이었고 지역별로는 서울, 울산이 다소 높은 농도이었다.

(3) 부유분진(TSP)

부유분진 농도는 최근에 다소의 감소 추세를 나타내고 있다. 표 9와 같이 지역별로는 서울, 부산, 대구가 다소 높았고 광주가 낮은 농도로 측정되었다.

(4) 일산화탄소(CO)

연탄을 가정난방 연료로 사용하는 우리나라는 일산화탄소의 대기중 농도가 표 10과 같이 서울이 가장 높아 2.7ppm이고, 울산이 1.3 ppm으로 가장 낮았다.

표 6 자동차 오염물질 배출량(1990)[6]

구 분		합 계	CO	NO_2	HC	TSP	'90년 말 보유대수
전국 (톤/연간)	계	1,751,362 (100%)	1,063,055 (100%)	412,182 (100%)	132,436 (100%)	66,889 (100%)	3,394,803 (100%)
	휘발유 자동차	760,432 (43.4%)	633,985 (59.6%)	53,034 (12.9%)	71,943 (54.3%)	128 (0.2%)	2,035,025 (59.9%)
	경 유 자동차	990,929 (56.6%)	429,069 (40.4%)	359,088 (87.1%)	60,493 (45.7%)	66,761 (99.8%)	1,359,779 (40.1%)
서울	계	526,045 (100%)	354,755 (100%)	97,190 (100%)	42,752 (100%)	14,379 (100%)	1,193,633 (100%)
	휘발유 자동차	316,278 (59.7%)	264,341 (74.5%)	21,399 (22.0%)	29,925 (70.0%)	56 (0.3%)	870,799 (73%)
	경 유 자동차	209,767 (40.3%)	90,414 (25.5%)	75,791 (78.0%)	12,827 (30.0%)	14,323 (99.7%)	322,834 (27%)
평균 1대당 (KS/연간)	휘발유 자동차	374 (34%)	312 (50%)	26 (9%)	35 (44%)	—	—
	경 유 자동차	729 (66%)	316 (50%)	264 (91%)	0.13 (5.1%)	49 (100%)	—
차종별 비교 (g/Km)	저공해 승용차	1.49 (3.3%)	1.14 (5.4%)	0.19 (1.1%)	2.41 (84.9%)	—	—
	대 형 버 스	43.16 (96.7%)	19.78 (94.6%)	16.40 (98.9%)	327 (0.6)	2.47 (100%)	—

표 7 지역별 아황산가스 농도[6]

연도별	SO_2(ppm)				
	서 울	부 산	대 구	광 주	울 산
1985	0.056	0.047	0.039	0.020	0.030
1986	0.054	0.042	0.043	0.020	0.032
1987	0.056	0.039	0.055	0.014	0.027
1988	0.062	0.044	0.052	0.019	0.028
1989	0.056	0.047	0.048	0.021	0.029
1990	0.051	0.039	0.041	0.017	0.031

표 8 지역별 질소산화물 농도[6]

연도별	NO_2(ppm)				
	서 울	부 산	대 구	광 주	울 산
1985	0.034	0.024	0.024	0.015	0.027
1986	0.033	0.024	0.024	0.018	0.030
1987	0.033	0.024	0.024	0.017	0.031
1988	0.033	0.019	0.023	0.014	0.026
1989	0.027	0.024	0.017	0.011	0.027
1990	0.029	0.019	0.018	0.014	0.022

(5) 탄화수소(HC)

탄화수소는 지역에 따라 다소의 차이를 보이나 대부분의 지역에서 최근에 높게 나타나고 있다. 표 11에 나타낸 바와 같이 부산은 3.4ppm으로 계속적인 농도의 증가를 보이고 있고, 서울도 3.0ppm으로 높게 측정되고 있다.

(6) 산성비(Acid Rain)

표 9 지역별 부유분진 농도[6]

연도별	TSP(ug/m³)				
	서 울	부 산	대 구	광 주	울 산
1985	216	184	190	159	159
1986	183	194	140	133	172
1987	175	197	146	105	190
1988	179	214	155	100	238
1989	149	178	128	116	165
1990	131	140	134	109	122

표 10 지역별 일산화탄소 농도[6]

연도별	CO(ppm)				
	서 울	부 산	대 구	광 주	울 산
1985	2.7	1.6	2.0	2.5	1.8
1986	3.0	1.6	1.8	2.4	1.9
1987	3.2	2.1	2.3	2.1	1.8
1988	2.8	1.9	2.5	2.0	1.5
1989	3.2	1.7	2.1	2.0	1.6
1990	2.7	1.5	1.9	1.5	1.3

표 11 지역별 탄화수소 농도[6]

연도별	THC(ppm)			
	서 울	부 산	대 구	광 주
1985	4.3	2.7	3.3	3.2
1986	2.7	2.5	2.2	1.5
1987	2.7	2.9	2.5	2.4
1988	2.6	3.0	2.4	2.4
1989	2.7	3.3	2.2	2.5
1990	3.0	3.4	3.0	2.5

일반적으로 수소이온 농도가 5.6 이하인 것을 산성비라고 정의하고 있다. 지역별로 산성비 측정결과는 표 12와 같다. 대부분의 지역이 산성을 띤 강우인 것으로 측정되었고, 특히 부산이 pH 5.1의 가장 높은 산성비가 내리고 있는 것으로 나타났다.

3.3 대기오염에 의한 영향

앞에서 서술한 바와 같이 대기오염물질은 계속 증가하여 발생하고 있다. 현재 우리나라에서는 환경관계법규상에 대기중 발생된 오염물질의 기준을 선정하고 있고 그들을 통제하려는 행정적 노력을 기울이고 있다. 그러나 환경중 오염물질이 현재 2,800여 종으로 밝혀져 있어 이들의 규제가 사실상 불가능한 상태이다.

표 12 지역별 산성비 측정농도[6] (單位 : pH)

연도 / 도시	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991
서울	5.5	5.3	5.1	5.7	5.6	5.0	5.4
부산	5.1	5.2	5.4	5.2	5.2	5.2	5.1
대구	5.4	5.4	5.3	5.6	5.3	5.7	5.9
광주	6.1	6.1	5.8	5.7	5.7	5.5	5.5
대전	5.7	5.4	5.5	5.7	5.8	5.4	5.6
울산	5.0	5.2	4.9	5.1	5.6	5.6	5.7

표 13 원인별 환경오염 피해 보상 현황[7]

구분 / 연도	계	대기 오염	수질 오염	토양	소음 진동	악취	기타
1986	1,160 (100)	209 (18.0)	138 (11.9)	12 (1.0)	630 (54.3)	141 (12.6)	30 (2.2)
1987	1,442 (100)	205 (20.0)	248 (17.2)	17 (1.2)	602 (41.7)	203 (14.1)	80 (5.6)
1988	1,219 (100)	263 (21.6)	169 (13.9)	15 (1.2)	546 (44.8)	159 (13.0)	67 (5.5)
1989	1;201 (100)	179 (14.9)	163 (13.6)	7 (0.6)	590 (49.1)	148 12.3)	114 (9.5)
1990	1,033 (100)	126 (12.2)	151 (14.6)	11 (1.0)	507 (49.1)	137 (13.3)	101 (9.8)

단위 : 건수, ( ) : %

(1) 생태계 및 피해현황

에너지 사용등의 환경오염 피해는 그 규모가 커질 뿐만 아니라 날로 심화되어 가고 있어 관심이 집중되고 있다. 표 13에서는 환경처에서 집계한 분야별 피해보상 현황으로 대기오염과 수질오염에 의한 피해의 규모가 크게 나타나고 있으며 소음진동 등도 커다란 문제를 야기시키

고 있다.

이외에도 우리 생활공간을 포함한 생태계 피해는 상당한 사회문제로 존재하고 있으나 제한점으로 인하여 이 글에서는 생략하도록 하겠다.

(2) 위해도 평가를 이용한 접근

대기중 규정된 오염물질들(nonregulated pollutants)은 그들의 영향을 평가하는데 많은 기간이 소요되거나 기술적으로 입증하기 어렵다. 더욱이 이들을 행정적으로 관리하기가 매우 힘들기 때문에 관리대상의 우선순위(priority pollutants)에서 제외되기가 쉽다. 그러나 이들 중에는 돌연변이원성이나 발암성인 것이 다수 포함되어 인체에 유해한 영향을 증가시키고 또한 가스상이나 부유분진에 흡착된 양상으로 호흡기를 통해 인체에 침투되어 노출기회를 증가시키므로 관리적인 측면에서 매우 중요하다.

유럽 WHO에서는 사람의 건강에 대해 관찰된 또는 발생할 것으로 기대되는 유해효과의 심각성 및 발생빈도(특히 비가역적인 영향) 환경중 대기오염물질의 편재성 및 오염농도 수준, 환경 내에서의 지속성, 특히 오염물질이 환경중에서 분해가 안되고 환경 또는 먹이사슬을 통해 축정성을 지니느냐의 여부, 노출 인구집단의 크기 및 위해에 처해있는 특정집단의 크기 등과 같은 요소들을 고려하여 총 28종의 대기오염물질을 선정하였다. 그리고 이들을 대상으로 위해성 평가를 실행하여 단위 위해도 추계치를 산출하였다. 이를 바탕으로 표 14, 표 15와 같이 권고기준을 설정하여 오염물질을 관리하고 있다.

우리나라의 경우 이러한 오염물질에 대한 연구가 매우 미진한 상태에 있다. 그러나 대기부유분진중 다핵방향족 탄화수소류(polynuclear aromatic hydrocarbons : 이하 PAHs) 및 중금속류(heavy metals)에 대해서는 일부 조사연구 되어졌다.[8] PAHs류 대부분은 체내에서

표 14 대기중 무기물질에 대한 세계보건기구의 권고기준

오염물질	기준	
	건강장해를 일으키지 않을 농도	단위농도(1ug/m³)에 대한 위험도 추계치
비소		$3*10^{-3}$
*석면		10^{-6}~10^{-5} (lung cancer) 10^{-5}~10^{-4} (mesothelioma)
카드뮴	10~20ng/m³	
일산화탄소	10mg/m³	
6가 크롬		$4*10^{-2}$
황화수소	0.15mg/m³	
납	0.5~1.0ug/m³	
망간	1ug/m³	
니켈		$4*10^{-4}$
이산화질소	150ug/m³(24hr)	
오존	100~120ug/m³(8hr)	
라돈	100uq/m³	
바나듐	1ug/m³	

*단위농도는 1,000Fibers/m³로 계산한 수치임.

표 15 대기중 무기물질에 대한 세계보건기구의 권고기준

오염물질	기준	
	건강장해를 일으키지 않을 농도	단위농도(1ug/m³)에 대한 위험도 추계치
아크릴로니트릴		$1.7*10^{-15}$
벤젠		$4*10^{-6}$
이황화탄소	20ug/m³	
1.2-디클로로에탄	0.7mg/m³	
포름알데히드	0.1mg/m³	
*벤즈(a)피렌		$9*10^{-5}$
스티렌	800ug/m³	
테트라클로로에틸렌	5mg/m³	
톨루엔	7.5mg/m³	
트리클로로에틸렌	1mg/m³	
염화비닐		$1*10^{-6}$

*Benzo(a)pyrene의 단위 농도는 ng/m³임.

전환된 Epoxide형태의 대사체가 암을 일으키며 그 중 가장 많이 알려진 물질이 Benzo(a) pyrene으로 폐암을 유발시키는 강력한 발암물질이다. 중금속류 또는 대부분이 독성 또는 발암물질로서 유해성이 큰 물질이다. 이중 알려진 발암물질로는 비소(As), 니켈(Ni), 크롬6가(Cr^{+6}) 및 베릴륨(Be) 등이 있고 이들 역시 폐암을 유발시킨다.[9]

미국 EPA나 유럽 WHO에서 위해성 평가를 통해 산출된 단위위해도 추계치를 적용하여 서울 일부지역의 오염수준에 따른 위해도를 산출하면 표 16과 같다. 서울시의 교통지역에서 Benzo(a)pyrene의 평균오염도에 따른 발암 위해도는 인구 10만 명 당 1명(10^{-5}) 이상의 위해도를 나타내었다. 이를 고려해 볼 때 관리대상 물질의 우선순위를 선정하는 것도 시급하며 이들 오염수준을 10^{-5} 이하의 위해도로 제어하는 것이 필수적으로 요구되어진다.

(3) 건강평가지수(PSI: Pollutant Standard Index)를 이용한 접근

정책적으로 환경오염을 관리하기 위하여 주로 문제시되며 기술적 그리고 경제적으로 관리가 가능한 행정적 목적으로 규정되어 오염물질(regulated pollutants)은 환경보전법상 7개 항목(SO_2 NO_2, TSP, CO, HC, O_3, Pb)이다. 이러한 오염물질들은 전국 대기오염 자동 측정망에 의해 상시 측정되고 있다. 그러나 대기오염 측정자료는 단순히 오염물질의 대기중 농도로 나타내기 때문에 이들 수치는 전문가 이외의 정책결정자나 대중에게서 이해되기 어려운 경향이 있다. 또한 대기오염 측정자료가 오염물질별로 분류되어 대기오염 상태를 종합적으로 나타내기가 어렵다. 따라서 대기오염상태를 쉽게 인지하고 대기질을 종합적으로 평가하기 위해 제안된 것이 지수(index)이다. 그러나 이러한 지수들의 혼재로 인한 어려움을 방지하기 위해 표준화되고 통일된 지수가 PSI이다.

PSI는 SO, TSP, NO, CO, Oxidant(O_3)의 5개 물질의 농도와 SO와 TSP의 농도를 곱한값(SO_2*TSP)등 6개의 부지수(subindex)로 구성된다.[10] 각각의 부지수 PSI 값을 구하여 그 중 최대값이 PSI가 된다. 이 때 최대값을 갖는 오염물질을 주 오염물질(critical pollutant)이라 한다. 각 부지수 PSI 값을 구하기 위해 "Segmented Linear Function"이 이용된다. 이때 각 직선의 종말점(break point)은 NAAQS, Federal Episode Criteria(경계, 경고, 유해한 수준), 매우 유해한 수준으로 구성된다. 각 부

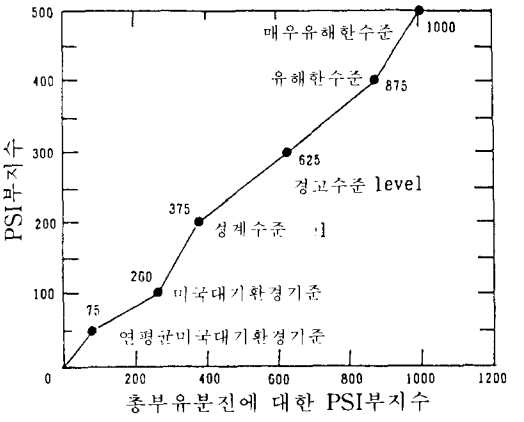

그림 3 총부유 분진에 대한 PSI부지수

표 16 서울시 일부지역의 발암 위해도 추계

물 질 명	연평균 오염도		단위위해도* 추 계 치	10만명당 발암위해도	
	교통지역	주거지역		교통지역	주거지역
벤즈(a)피렌(ng/m³)	3.10	2.02	9×10^{-5}	27.9	18.2
비소(ug/m³)	0.017	0.028	3×10^{-3}	5.1	8.4
니켈(ug/m³)	0.049	0.038	4×10^{-4}	2.0	1.5

지수 PSI 값은 이들 기준을 근거로 하여 NAAQS의 1차 기준치의 50%, NAAQS의 1차 기준치에 해당하는 농도를 100, Federal Episode Criteria 중 Alert에 해당하는 농도를 200, 경계수준에 해당하는 농도를 300, 유해한 수준에 해당하는 농도를 400, 그리고 매우 유해한 수준에 해당하는 농도를 500이 되도록 지수화한 것이다. 이를 그림 3에 예를 들어 도해하고 있다.

PSI계산방법은 다음과 같다.

$$I = sj(x - aj) + bj$$

$$sj = \frac{bj+1-bj}{aj+1-aj} \text{(두 breakpoint사이 직선의 기울기)}$$

for $aj < x < aj+1$ (X : 오염물질의 농도)

$$\text{PSI} = \max\{I_1,\ I_2 \cdots I_6\} \quad (1)$$

여기서, I는 부지수 PSI값을 나타낸다.

이 때 필요한 계수는 표 17에 PSI값에 따른 건강에 대한 영향평가 및 주의사항을 표 18에 제시하였다. 표 19와 표 20은 서울시 각 지역의 대기오염 수준에 따른 유해성을 평가하고 그를 토대로 관리방안을 모색하기 위해 PSI를

표 17 컴퓨터에 의한 PSI 산출계수(ppm)

		일산화탄소		옥시단트		질소산화물		아황산가스		총부유분진*아황산가스		총부유분진 (ug/m³)	
		aj	sj	aj	sj	aj	sj	aj	sj	aj	sj	aj	sj
1	0	0.0	11.111111	0.0	1250.0000	b	b	0.0	1666.6667	b	b	0	0.66666667
2	50	4.5	11.111111	0.04	1250.0000	b	b	0.03	454.54546	b	b	75	0.27027027
3	100	9.0	16.666667	0.08	833.3333	b	b	0.14	625.00000	b	b	260	0.86956522
4	200	15.0	6.666667	0.20	500.0000	0.6	166.66667	0.30	333.33333	24.82	1.3361839	375	0.4000000
5	300	30.0	10.000000	0.40	1000.0000	1.2	250.00000	0.60	500.00000	99.66	1.9825535	625	0.4000000
6	400	40.0	10.000000	0.50	1000.0000	1.6	250.00000	0.80	500.00000	150.1	2.7027027	875	0.8000000
7	500	50.0	10.000000	0.60	1000.0000	2.0	250.00000	1.00	500.00000	187.1	2.7027027	1000	0.8000000

표 18 지수값에 따른 건강평가 및 주의사항

PSI값	평 가	건강에 대한 일반적인 영향	주 의 사 항
0~50	양호(good)	—	—
50~100	보통(moderate)	—	—
100~200	건강에 유해 (unhealthful)	민감한 사람에 있어서 증상의 다소 악화 그리고 건강한 인구집단내에 자극증상발생	심장 또는 호흡기질환자는 육체활동 및 실외활동을 줄여야 함.
200~300	건강에 매우 유해 (very unhealthful)	심장 및 폐질환자에 있어 증상의 악화 및 운동능력감소 그리고 건강한 인구집단내에서 다양한 증상발생	노인과 심장 및 폐질 환자는 실내에서 머물고 육체적 활동을 줄여야 함.
300~400	위험(hazardous)	건강한 사람에 있어 증상의 악화와 더불어 질병의 조기발생, 운동 능력 감소	노인과 환자는 실내에서 머물고 육체적 활동 삼가 그리고 일반인구집단은 실외활동삼가
400~500	위험(hazardous)	환자 및 노인의 조기사망 그리고 건강한 사람에 있어 일상생활에 영향을 주는 증상 발생가능	모든 사람은 창문과 문을 닫은 채 머물러야 하고 육체활동을 최소화해야 함.

표 19 서울시 대기오염측정지점에서 PSI값의 통계적 특성(1988)

지 점	평균값	표준편차	최고값	최저값
면목동	126.52	76.25	over 500	34.00
문래동	114.02	69.01	445.60	51.08
마포동	121.01	80.96	over 500	28.00
신설동	107.79	84.47	over 500	38.67
길음동	120.32	77.07	420.80	51.08
불광동	87.80	67.56	over 500	26.67
신림동	66.58	39.00	429.60	22.67
잠실동	84.38	60.08	483.20	23.33
대치동	79.14	34.83	323.60	33.33
광화문	93.94	64.38	492.00	44.00

표 20 서울시 대기오염측정지점에서 PSI지수값의 분포(1988년 측정자료이용) (단위 : %)

PSI지수	면목동	문래동	마포	신설동	길음동	불광동	신림동	잠실동	대치동	광화문
양호	2.91	0	2.86	8.25	0	10.71	23.83	11.38	2.24	1.96
보통	48.84	72.42	64.29	65.05	69.12	77.86	72.43	74.25	90.13	75.49
건강에 유해	26.74	2.51	6.43	10.19	8.82	3.57	1.87	6.59	5.83	13.73
건강에 매우 유해	19.19	24.23	24.29	13.59	19.12	5.71	0.93	6.59	0.90	6.86
위험	2.33	0.84	2.14	2.91	2.94	2.14	0.93	1.20	0.90	1.96

적용하여 평가하였다. 그 결과 일부지역에서는 미국 대기환경기준(NAAQS)에 상응하는 PSI 100 이상을 초과하여 건강에 유해한(unhealthful)수준을 나타내었다. 평가지역 대부분에서 주 오염물질은 SO_2 및 TSP가 우세하였다.

현재 우리나라의 경우는 대기중 개개의 오염물질 농도를 단지 환경기준치와 비교하여 오염정도를 평가하고 있는 정도이다. 따라서 대기오염을 조합적으로 평가하고 유해성 평가 및 관리방법을 PSI와 같은 지수를 적용해야 할 것이다. 적용시, 노출에 따른 피해를 최소화하기 위해 PSI 100에 해당하는 기준으로 환경기준을 재조정하거나 우리나라 실정에 적합한 기준을 설정하여 그 기준에 상응하는 PSI 이하로 대기질을 유지하려는 노력이 필요할 것이다.

(4) 초과사망(Excess Death)을 이용한 접근

역사적으로 Air Pollution Episode로 인해 많은 사상자를 유발시켰다. 그중 영국 런던에서는 1952년 3,900명, 1962년에 850명의 사망자가 발생하였고 미국 뉴욕에서는 1966년 추수감사절 때 168명의 사망자가 발생하였다. 이러

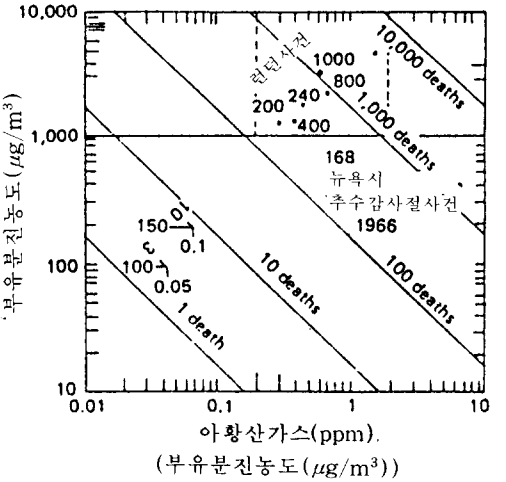

그림 4 SO_2와 TSP 오염도에 따른 초과사망지수

한 대기오염에 따른 피해를 예방하기 위한 목적으로 대기오염 대사건에 대한 많은 연구가 진행되었다. 그 결과 두 사건을 토대로 하여 그림 4의 SO_2, TSP 오염도에 따른 초과 사망자수를 예측할 수 있는 식 (2)를 얻게 되었으며, 그림 5는 SO_2와 TSP오염도에 따른 런던사건과 1966년 추수감사절 때 뉴욕시에서의 사망자수를 나타낸다.[11]

$$ED=0.6SP \tag{2}$$

여기서, ED는 초과 사망자수/천만 명 당(15일 간), S는 SO_2 농도(ppm), P는 TSP 농도(ug/m³)를 나타낸다.

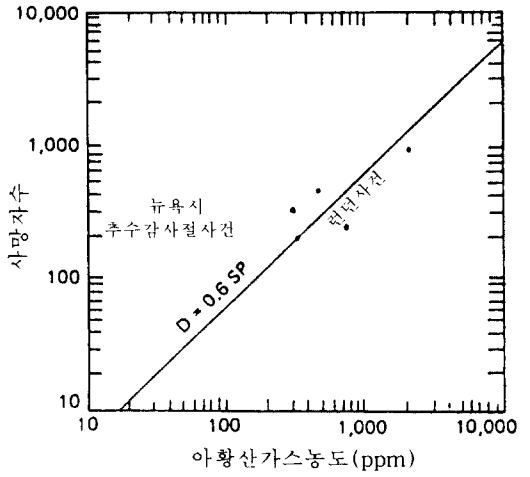

그림 5 SO_2와 TSP에 오염도에 따른 뉴욕과 런던에서의 사망자수

표 21 서울시 일부지역의 계절별 대기오염도에 따른 초과사망률 추계[12]

지 역	겨 울 (1, 2월)	봄 (3~5월)	여 름 (6~8월)	가 을 (9~11월)
광화문	4.74	2.15	0.69	2.79
면목동	10.47	8.74	2.58	8.75
신설동	7.52	4.33	0.95	2.20
불광동	5.33	2.69	0.94	2.48
문래동	15.5	8.92	4.06	6.01
신림동	7.24	3.25	1.21	1.75

(15일간 초과사망수/천망명당)

이러한 공식을 우리나라 대기 환경기준(24시간 평균)인 SO_2 0.15ppm 및 TSP 300 ug/m³에 적용했을 때, 만약 이 농도가 15일 간 유지된다면 인구집단 천만 명 당 27명(십만 명 당 약 0.3명)이 사망함을 예측할 수 있다.

이 방법을 서울시 일부지역의 대기오염도와 관련하여 적용할 때 표 21의 면목동과 문래동의 경우는 난방기인 1~2월에 천만 명 당 10명 이상의 초과 사망을 예측할 수 있다.

이러한 접근법을 이용하여 발생할 수 있는 초과 사망자수를 예측하여 미연에 방지하고 이를 위해 SO_2 및 TSP에 의한 대기오염도를 감소시켜야 할 것이며 그에 합당한 환경기준을 재조정해야 한다.

(5) 미생물학적 방법을 이용한 접근

물질의 발암성 여부의 확인은 각종 동물을 이용한 실험방법으로 행해지는데 이 같은 실험은 막대한 비용과 수년의 기간을 필요로 한다. 이를 해결하기 위해 개발된 검색 방법 중의 하나가 미생물을 이용한 돌연변이원성 시험법이다. 이미 체세포의 돌연변이는 발암과 밀접한 관계를 갖고 있어 발암물질의 85% 이상이 돌연변이원으로 밝혀진 이래 돌연변이 유발물질에 대한 연구가 발암물질의 규명을 위한 1차적 검증으로서 커다란 비중을 차지하게 되었다.

이러한 대기중 오염물질중 분진추출물을 대상으로 유기물(EOM)을 추출하여 이중의 Benzo(a)pyrene의 정량결과에 의해 산출된 초과 사망률에 의해서 EOM에 의한 초과 발암사망률을 산출해 볼 수 있다.

$$\text{EOM에 의한 초과 사망률}=A\times\frac{B}{C\times D} \tag{3}$$

여기서, A는 BaP에 의한 초과 사망률, B는 EOM의 연평균 돌연변이도(rev/m³), C는 BaP의 단위 돌연변이도(rev/ug), D는 BaP의 연평균농도(ng/m³)를 나타낸다.

이와 같이 적용한 돌연변이 결과에 의한

표 22 대기부유분진의 돌연변이원성에 의한 초과 발암 확률[12]

구 분	단위체적당 돌연변이도(rev/m³)	백만 명 당 초과발암확률
유기물(EOM)	7.75	52
중성분획	6.88	42
PAHs분획	0.58	3.8
벤즈(a)피렌[1]	1.84(ng/m³	0.96
WHO[2]	1.84(ng/m³)	160

1) 벤저(a)피렌의 정량 농도에 의한 초과발암 확률
2) WHO의 단위 위해도 추계치 : 9×10^{-5}

BaP이 함유된 EOM에 의한 초과 발암사망률을 단순 비교해 보았을 때 표 22과 같이 52명의 초과 발암 사망률이 산출되었다.

또한 액성별로 세부분획화한 중성분획의 돌연변이에 의해서는 42명의 초과 발암 사망률이 산출되었으며 PAHs 분획만에 의해서는 3.8명으로 다른 유기물질들을 제거하고 더 분획화하였을 경우 위해도치가 크게 감소하는 것을 알 수 있었다.

본 실험에 의한 Benzo(a)pyrene의 농도를 WHO(1988)에서 역학자료들을 토대로 추계한 위해도 추계치인 9×10^{-5}을 적용하면 백만 명당 160명의 수준으로 나타났다.

위와 같은 결과는 유기추출물질에 Benzo(a)pyrene을 비롯한 PAHs 이외에 더 많은 복합 유기물질의 존재에 따라 발암위해가 더욱 가중된다는 것을 시사하는 것이며 대기중 부유분진에 의한 총체적 위해성을 평가하기 위해서 Benzo(a)pyrene을 지표로 한 복합물질에 대한 위해 부분이 돌연변이원성 결과에 의해 보완될 수 있다고 하겠다.

4. 에너지 수급에 따른 환경보전대책

에너지 사용에 따른 대기오염 정도는 날로 심각해져가고 있고 이들의 적절한 제어를 위한 노력이 절실한 시기이다.

표 23에서 주요에너지의 변화추이를 보면

표 23 주요에너지 지표 변화추이[13]

구 분	단 위	1980	1990	1996	2001
에너지 수요	백만 TOE				
총 에너지		43.9	93.2	112.8	145.6
수입 에너지		32.3	81.9	113.9	143.6
1인당 에너지소비					
총 에너지	TOE	1.15	2.14	2.71	3.19
전 력	kWh	859	2,206	3,371	4,284
석유 의존도	%	61.1	53.8	52.8	52.5
화석연료 비율	%	78.7	83.2	85.6	83.3
수입 의존도	%	73.5	87.9	91.7	94.2
(원자력 제외)	%	71.6	73.7	79.3	79.3

표 24 입증된 천연가스 보유량(1990년)[14]

국 가	천연가스 보 유 량	현재의 석유소비를 적용시 가스 보유 지속가능 연수
	(10억 입방미터)	(연수)
소련	52,000	95
이란	17,000	437
캐나다	7,578	100
아르헨티나	7,154	282
아랍에미레이트	5,492	659
사우디아라비아	5,135	906
미국	4,930	7
카타르	4,621	2,080
알제리	3,250	132
이라크	3,115	117
베네수엘라	2,993	56
인도네시아	2,423	64
노르웨이	2,295	207
오스트레일리아	2,170	75
멕시코	2,060	29
말레이시아	1,485	176
쿠웨이트	1,370	69
리비아	1,218	84
인디아	1,100	19
중국	1,000	9

2001년에는 145.6TOE로 현재의 사용량을 훨씬 웃돌아 대안의 제시 및 실천이 시급하다 하

겠다.

4.1 행정적 대책

에너지 수급에 따른 오염물질의 배출을 억제하기 위해서 우선 선행되어야 할 대안으로는 법률적인 제제가 가능한 행정적 조치이다.

현재까지의 사회구조나 산업구조는 무분별한 발전만을 행해옴에 따라 불균형한 성장을 계속하여 왔다. 또한 이들의 사용연료에 따한 적절한 대안이 제시되지 못하여, 이를 위한 가장 시급한 시행과제로는 첫째, 에너지정책에 대한 환경영향평가(environmental impact assessment)의 실시이다. 현행환경영향평가는 시설 등이 대단위 구조물에 국한되어 왔으나, 산업, 상업, 가정, 이송 등의 분야별 평가로 적절한 시책의 수립이 가능하며, 또한 지역적인 균형을 이룰 수 있고 시기별 문제점을 도출하여 적절한 대안이 제시될 평가가 필요하다.

둘째, 대체에너지의 수급계획이다. 현재 일부지역에 적용되고 있는 천연가스의 전국적인 수급대책이 필요하다. 10년 전만 해도 많은 국가들이 천연가스자원이 고갈될 것으로 생각해 왔으나 최근 천연가스 매장량이 충분한 것으로 보고되고 있어 이의 재고가 필요하다.

셋째, 고부가가치의 저에너지 산업으로의 산업구조변화를 위한 노력이다.

현재까지의 개발도상국형 에너지소모 산업구조를 저에너지산업으로의 방향전환을 모색하여 이의 적극적인 확산작업이 필요하다.

4.2 기술적 대책

다음은 신기술 개발을 위한 분야이다.

첫째, 대체에너지의 개발 사업이다. 우리가 살고 있는 지구의 가장 풍부한 자원인 태양광선의 이용이 우선이며 또한 풍력, 생체에너지, 지열동력 등의 재생 가능 에너지의 개발을 해야 할 때이다.

둘째, 에너지 효율증대를 위한 내연기관의 개발이다. 현재 사용되는 모든 기관보다 월등히 커다란 힘을 낼 수 있는 기술적 효율을 증대하기 위한 노력이 필요하다. 또한 저장이 불가능한 저기의 저장능력을 위한 투자가 필요하다.

셋째, 연구지원사업의 확장이다. 에너지의 효율적 사용과 대체에너지의 개발 등 많은 대책을 위한 끊임없는 연구지원사업이 이루어져야겠다.

끝으로 이러한 대책의 수행을 위한 교육적 투자와 국민적 홍보의 융합만이 현재의 에너지 문제를 슬기롭게 풀어나갈 수 있는 길이라 생각되며 더 나아가 지구생태계의 보전을 위한 커다란 노력이 절실한 시기라 하겠다.

참고문헌

(1) Fricket, J., 1931, Bulletin. Academie Royale de Medecine de Belgique. No. 11, p. 683.

(2) Ministry of Health, 1954, "Mortality and Morbidity During the London Fog of December 1952."

(3) Mohnen, V.A., 1991, "The Conflict over Global Warming", Global Environmental Change.

(4) British Petroleum, 1991, "BP Statistical Review of World Energy," London.

(5) 동력자원부, 1991, 에너지 통계연보.

(6) 환경처, 1991, 한국환경연감.

(7) 환경처, 1991, 환경백서.

(8) Ott, W.R., 1976, "A Critical Review of Air Pollution Index System in the United States and Canada," Pollution Air Pollution Control Association, Vol. 26, No 5, pp. 461~470.

(9) WHO, 1987, "Air Quality Guidelines for Europe."

(10) 환경처, 1985, "대기오염이 경기에 미치는 영향과 그 방지대책."

(11) Larsen, R.I., 1970, "Relating Air Pollutant Effects to Concentration and Control," Air Pollution Control Association, Vol. 20,

No. 4, pp. 216~225.
(12) 정용, 1991, "환경오염물질의 위해성평가와 관리방안," 연세대 환경공해연구소.
(13) 건설부, 1991, "제3차 국토종합개발계획서."
(14) Ulnited Nations, 1991, "Yearbook of Energy Statistics," New York.