

오존 대기 환경기준의 비교 연구

A Comparative Study on Ambient Air Quality Standard for Ozone

허 정 숙 · 김 태 오¹⁾ · 김 동 술

경희대학교 환경학과 및 환경연구소

¹⁾서울대학교 정밀기계설계 공동연구소 나노입자 제어기술연구단

(1998년 11월 11일 접수, 1999년 3월 10일 채택)

Jeong-Sook Heo, Tae-Oh Kim¹⁾ and Dong-Sool Kim

*Department of Environmental Science and Institute of Environmental Studies,
Kyung Hee University*

¹⁾*Center for Nano Particle Control, Institute of Advanced Machinery and Design,
Seoul National University*

(Received 11 November 1998; accepted 10 March 1999)

Abstract

Based on air quality monitoring data ('89~'97) operated by the Department of Environment, we provide various fundamental statistics for ground ozone. The purposes of this paper are to review the national ambient ozone standard, to compare methods to calculate average ozone level, to examine the occurrences of ozone episodes, and finally to study spatial distribution of ozone. Since we, in Korea, calculate 8-hour average ozone level 3 times a day (1~8, 9~16, 17~24 hours), the method does not seem to be scientifically sound comparing to a running average method adapted by the USEPA. When we counted the number of cases with 8-h average O₃ level exceeding 60 ppb (8-h average standard in Korea) and 80 ppb (that in the U.S.A.) and also when we calculated 8-hour average ozone level based on the US method, some regions were classified as non-attainment areas. Especially in Seoul, results of spatial distribution analysis showed that high level ozone over 80 ppb was observed at Kuui-Dong and Pangi-Dong in the eastern part and at Ssangmun-Dong in the northeastern part. Also, occurrences of ozone episode defined as number of days when ozone level exceeding 80 ppb for 3 consecutive hours were extensively reviewed in this paper.

Key words : ground-level ozone, ozone standard, ozone episode, spatial distribution analysis

1. 서 론

지난 수년간 고농도 오존의 환경 및 인체에 미치

는 영향에 대한 관심이 지속적으로 증가하고 있다. 오존은 2차 오염물질로서, 생성 정도가 오존 전조물질 (precursor)의 농도와 일사량, 온도, 풍향, 풍속 등 기상조건 및 지역 환경인자와 밀접한 관련이 있다

(Vukovich, 1995). 또한, 오존은 반응성이 큰 산화제로서 호흡기에 자극을 주며, 합성고무, 직물, 페인트 등의 물질을 부식시키고, 식물잎의 탈색과 세포조직을 파괴하여 큰 피해를 준다. 최근 각종 연구보고들에 따르면, 오존의 인체 및 동식물에 미치는 영향은 단시간의 120 ppb 이상 고농도 노출보다 80 ppb 정도라도 장시간 노출의 피해가 더욱 큰 것으로 알려져 있다(Lefohn, 1997; Spektor *et al.*, 1990; Tilton, 1989; Sun, 1988). 우리나라의 오존에 대한 대기환경기준은 1시간 대기 환경기준치 0.1 ppm과 1994년 1월에 추가된 8시간 대기 환경기준치 0.06 ppm이 함께 시행되고 있다. 한편, 미국 EPA에서는 1997년 7월 오존에 대한 NAAQS (national ambient air quality standard)로 기존의 1시간 0.12 ppm 기준치를 8시간 평균 0.08 ppm으로 대체 개정하는 등 오존에 관한 규제기준을 합리적으로 강화하였다. 또한, 기존 1시간 기준치에서 8시간 기준으로 이행을 원만하게 하기 위한 목적으로, 1시간 기준(최근 3년간 연간 1회 이상 0.12 ppm을 초과해서는 안됨)을 만족하지 못한 지역에 대해 1시간 기준을 달성할 때까지 1시간 기준을 함께 적용하고 있다. 미국 EPA에서는 이미 최근 3년간 자료('94~'96년과 '95~'97년)를 이용하여 1시간 기준 달성지역을 판정하였고, 많은 지역에서 1시간 기준을 적용시키지 않을 것이며, 2000년에는 최근 3년('97~'99) 동안 8시간 기준을 달성하지 못한 미달성지역을 발표할 것이다(USEPA, 1998b). 실제 우리나라와 미국의 환경기준은 ppm 단위로 표시되어 있지만, 본 논문에서는 이하 오존 농도를 ppb 단위로 표시할 것이다.

오존의 영향으로 만성 호흡질환, 천식 악화, 폐활량 감소, 폐렴, 생체 면역능력의 감소와 같은 현상이 나타날 수 있다. 또한, 오존은 기관지를 통해 인체 내부로 유입되어 기관지의 세포 및 조직에 영향을 미치며 기관지 질환과 폐기능의 악화를 초래한다(Tilton, 1989). 특히, 어린이의 호흡기는 미발달 단계에 있고, 성인과 비교하여 체중당 요구되는 공기량이 많으므로 성인보다 오존의 유해한 영향을 더욱 많이 받는다. 건강한 성인도 120 ppb 농도 이하에서 6.6시간 노출될 때, 급격한 폐활량 감소가 나타나며(Tilton, 1989; Sun, 1988), 이 결과 오존의 영향은 장시간 축적으로, 현재의 기준치 이하에서도 폐기능

악화를 가져올 수 있다(Lefohn, 1997). 또한, 1~2시간 고농도 오존에 노출된 어린이가 보다 장시간(6~8시간) 동안 120 ppb 이하의 오존농도에 노출된 어린이가 더욱 심각한 폐기능 장애가 있었던 것으로 조사되기도 하였다(Spektor *et al.*, 1990).

LA에서는 천식증상이 오존과 미세먼지와 밀접한 관련이 있는 것으로 조사되었으며, 캐나다 Southern Ontario 지역에서는 여름철에 천식환자가 더욱 증가하는 것으로 보고된 바 있다(Koenig, 1995). 미국의 EPA에서도 호흡질환으로 인하여 병원을 찾는 환자수와 최대 오존농도 사이에 선형적인 관계가 성립함이 확인되었다(Wolff, 1996). 한편, 실험 쥐가 3시간 동안 오존농도 80~100 ppb로 노출되었을 때 병원성 박테리아에 대한 생체 면역능력이 감소하였다(Lippman, 1989).

오존은 식물에 대한 광화학 독성물질로 식물의 잎 표면에 반점을 생기게 하고, 노화현상을 야기하여 광합성작용을 방해하며, 식물의 성장력을 감소시킨다(Lefohn, 1997). 1940년 중반 LA에서 농작물에 대한 광범위한 피해는 오존 또는 PAN과 같은 광화학 독성물질 때문으로 밝혀졌으며, 미국에서 연간 10억달러의 농업수확량 감소도 오존의 영향때문이라고 보고된 바 있다(Showmann, 1991). 또한, 오존은 직물을 퇴색시키며, 고무를 노화시키기도 한다(Godish, 1991).

이와 같이 오존은 인체의 건강과 동식물에 미치는 영향이 매우 크며, 재산상에 미치는 영향도 매우 크다. 현재 국내에서는 오존의 피해에 관한 연구가 극히 제한적으로 이루어지고 있으며(조수현 등, 1998), 위해성 평가와 관련된 연구도 미비한 실정이다.

현재 국내 대기오염의 기초연구는 상당히 미흡한 실정으로, 오존오염의 현황 및 영향, 위해도 평가, 측정망의 정립, 저감방안 강구 등 일련의 문제점에 대한 기초연구가 요구된다.

따라서, 본 연구에서는 국내 자동측정망 자료를 바탕으로 오존오염의 현황을 분석하고자 하였으며, 우리나라의 오존에 관한 대기 환경기준 및 농도산정법을 미국 EPA의 것과 비교 검토하여 개선 방향을 제시하고자 하였다.

2. 오존 측정망의 현황과 결측율

대기오염 자동측정망은 1997년말 현재 전국 16개 시·도지역의 114개 측정소에서 대기 환경기준 물질(SO₂, TSP, PM-10, CO, NO₂, O₃)을 1시간 간격으로 연속 측정하고 있다. 측정된 모든 자료는 자동감시망(TMS: telemetering system)를 통해 관할 환경관리청 및 환경부로 전송되고 있다(환경부, 1998). 참고로 대기오염 자동측정망 측정소는 서울 20개, 경기 17개, 부산 9개 측정소 등 대도시 지역에 밀집되어있다. 일반적으로 대기질 측정소는 인구 밀집지역의 대기질 농도를 대표할 수 있어야 하며, 특별한 오염원에 의한 주변 대기질의 영향을 파악하거나, 배경농도를 결정하기 위한 목적을 가지고 설치되어야 한다(USEPA, 1998a). 실제, 서울지역의 20개 자동측정망은 주거지역 12개소, 녹지지역 3개소, 상업지역 2개소, 공업지역 1개소, 준공업지역 2개소로 구성되어 있으나, 각 측정소가 위치한 지역의 용도는 토지이용도만을 고려한 것으로 측정소 주변지역의 용도가 고려되지 않았으며, 측정소 설립당시와 현재의 용도가 커다란 차이를 보이는 지역이 많아, 해당 지역의 대기질을 대표할 수 있는지가 논란이 되고 있다.

표 1은 '89년부터 '97년까지 오존에 대한 시·도별 연간 결측율을 표시한 것이다. '91년 평균 결측율이 22.3%와 '93년 결측율 22.4%로 가장 높았으며, '97년 11.3%로 가장 높은 자료확보율을 나타냈다. '94년 이후 전국적으로 결측율이 15% 미만 수준으로 감소하고 있어 자료확보율은 크게 개선되고 있었다. '97년 11.3%의 결측율은 매일 2.5회 정도가 미측정되고 있음을 의미한다. 전국에서 가장 결측율이 높은 지역은 충남으로 '95년 자동측정망이 처음 가동된 이후 평균 35% 이상의 높은 결측율을 보였다.

3. 오존 에피소드 (고농도오존 발생)의 분석

고농도 오존 발생(이하 "오존에피소드"라고 칭함)을 정의할 때 여러 가지 견해가 있다. Ludwig *et al.* (1995), Chico *et al.* (1991), Lyons *et al.* (1991) 등은 NAAQS의 1시간 기준치 120 ppb를 초과할 때를 오존에피소드로 정의하였다. 또한, Bower *et al.* (1994)은 1시간 평균농도가 60 ppb 이상 둘 혹은 그 이상 지역에서 발생한 경우를 오존에피소드 일(day)로 간주하였다. Fuentes와 Dann(1993)은 캐나다의 1시간 최대 허용기준치인 82 ppb 이상이 둘 또는 그 이

Table 1. The percent of missing data for ozone at air quality monitoring sites from 1989 to 1997 in Korea.

[The percent of missing data for ozone, % (Number of monitoring sites)]

Site	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Seoul	17.2(20)	22.3(20)	31.1(20)	28.8(21)	22.2(20)	5.0(20)	10.3(20)	9.7(20)	5.1(20)
Kyonggy	8.2(10)	16.9(11)	16.5(12)	10.4(12)	29.5(12)	12.2(14)	24.6(14)	19.5(14)	10.3(17)
Incheon	24.5(3)	12.6(3)	11.3(3)	23.7(3)	23.6(3)	12.7(3)	20.5(3)	9.6(3)	11.3(3)
Taejeon	58.3(2)	15.7(3)	9.4(3)	2.0(3)	18.2(3)	3.3(3)	10.5(3)	4.6(3)	8.3(3)
Taegu	24.6(3)	31.7(5)	15.2(5)	15.7(5)	21.5(5)	16.5(5)	4.2(5)	8.9(5)	6.8(6)
Pusan	16.2(6)	19.8(7)	58.8(7)	53.3(7)	16.4(7)	7.1(7)	5.0(7)	6.7(6)	6.3(9)
Ulsan	20.5(7)	14.5(7)	5.9(7)	14.0(7)	25.3(7)	8.9(7)	8.2(7)	33.4(7)	4.4(7)
Kwangju	9.0(2)	22.0(2)	51.5(3)	17.0(3)	19.4(3)	4.8(3)	6.4(3)	6.8(3)	30.0(4)
Kangwon	0.4(1)	24.1(3)	12.3(3)	7.4(3)	14.5(3)	27.4(4)	19.2(4)	8.8(4)	9.7(4)
Kyongbuk	15.3(1)	34.1(3)	13.2(4)	7.5(4)	20.9(4)	8.0(5)	7.2(6)	12.8(6)	6.8(9)
Kyongnam	-	-	37.9(2)	23.9(2)	23.8(2)	32.5(3)	8.3(4)	7.0(4)	7.6(8)
Chungbuk	0.3(1)	23.3(2)	7.5(2)	17.0(2)	27.9(3)	10.3(3)	10.4(3)	10.8(3)	11.2(4)
Chungnam	-	-	-	-	-	-	47.5(3)	34.8(3)	29.6(4)
Cheonbuk	18.3(2)	12.2(2)	14.9(2)	18.8(2)	28.9(2)	11.4(3)	4.4(3)	5.9(3)	11.4(4)
Cheonnam	8.5(1)	13.2(1)	26.9(2)	4.6(2)	21.7(3)	8.2(3)	18.9(4)	7.6(4)	5.6(8)
Cheju	-	-	-	-	-	-	20.8(2)	9.9(2)	17.0(2)
Average (Total Sites)	17.0(59)	20.2(69)	22.3(75)	17.4(76)	22.4(77)	12.0(83)	14.2(91)	12.3(90)	11.3(114)

상의 지역에서 발생된 경우를 에피소드라 하였다. 한편, 영국에서는 8시간 평균 오존농도 값이 8시간 기준치 50ppb 이상 발생할 경우를 에피소드로 정의하였으며 (AEA Tech., 1998), Poulida *et al.* (1991)은 오존농도 80ppb 이상 3시간 이상 지속된 경우를 오존에피소드라 하였고, 에피소드가 하나 또는 그 이상인 날을 오존에피소드 일로 정의하였다.

따라서, 오존에피소드의 개념을 크게 3가지 형태로 분류할 수 있다. 첫째, 오존농도가 1시간 기준치를 초과한 경우, 둘째, 오존농도가 기준치 이상 두지역 또는 그 이상의 지역에서 발생했을 경우, 셋째, 기준농도치 이상 장시간 지속된 경우이다. 따라서, 1시간 오존농도 기준치를 초과하는 단기간의 오존 노출보다 기준치 이하의 농도에서도 장시간 노출될 경우 인체에 위해하다는 실험결과 (Lefohn, 1997; Spektor *et al.*, 1990; Tilton, 1989; Sun, 1988)로 이루어진 오존에피소드 개념은 장시간 기준농도 이상으로 발생한 경우로 정의하는 것이 바람직하다고 할 수

있다

오존농도가 80ppb 이상으로 3시간 이상 지속된 경우를 오존에피소드로 정의할 때, 1989년부터 1997년까지 서울시와 전국의 오존 에피소드 현황을 표 2와 3에 제시하였다. 서울지역에서 가장 많은 에피소드가 발생한 지역은 방이동으로 9년간 115회, 총 472시간 동안 고농도 오존이 나타났다. 다음은 북한산, 도봉산 등에 둘러싸여 있는 쌍문동에서 98회, 총 427시간이 기록되었으며, 광화문지역은 55회, 220시간이 관측되었다. 서울시 전지역에서의 오존 에피소드는 '94년부터 증가추세를 보였고 '95년에 잠시 감소하다가 '96년부터 상승하여 '97년에 160회에 걸쳐 총 638시간이 기록되는 등, 매년 그 횟수가 증가하고 있다. 한 건의 오존에피소드가 발생했을 때 평균지속시간은 약 4.1시간 정도로 분석되었다. 성수동, 구의동 및 방이동이 위치한 한강하류지역의 동부지역과 쌍문동을 포함한 동북부지역에서 에피소드 발생건수가 공업지역인 서부지역의 오류

Table 2. The summary of ozone episodes for the period 1989~1997 in Seoul. The table contains the number of day with ozone concentration exceeding 80 ppb for 3 consecutive hours. [Total cases (Total hours)]

Monitoring Sites	'89	'90	'91	'92	'93	'94	'95	'96	'97	Total Cases (Hours)	Hours/ Cases*
Chamshil	0(0)	0(0)	0(0)	10(39)	2(9)	5(20)	5(15)	13(51)	3(10)	38 (144)	3.8
Chamshil 1	0(0)	8(39)	8(26)	0(0)	-	-	-	-	-	16(65)	4.1
Banpo	1(3)	0(0)	6(25)	1(3)	3(11)	12(51)	1(3)	4(13)	11(41)	39 (130)	3.8
Hannam	0(0)	3(14)	6(25)	1(4)	1(3)	7(29)	1(4)	6(18)	7(34)	32 (131)	4.1
Hwagok	-	-	-	8(36)	0(0)	11(41)	0(0)	3(13)	0(0)	22(90)	4.1
Kirum	0(0)	0(0)	4(17)	6(26)	3(9)	4(15)	1(3)	4(15)	4(13)	26(98)	3.8
Kuro	0(0)	4(18)	0(0)	16(87)	0(0)	13(54)	3(11)	3(11)	2(7)	41 (188)	4.6
Kuui	8(32)	1(3)	17(75)	6(26)	0(0)	7(25)	8(26)	19(79)	21(94)	87 (360)	4.1
Kwanaksan	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	8(30)	4(13)	12(43)	3.6
Kwang-hwamun	0(0)	0(0)	3(11)	24(100)	11(38)	7(38)	0(0)	1(3)	9(30)	55 (220)	4.0
Mapo	0(0)	0(0)	11(41)	9(34)	1(3)	2(8)	1(6)	2(9)	1(3)	27 (104)	3.9
Mullae	0(0)	0(0)	3(10)	0(0)	0(0)	2(6)	0(0)	0(0)	2(9)	7 (25)	3.6
Myonmok	0(0)	2(6)	0(0)	0(0)	0(0)	3(10)	0(0)	3(10)	7(24)	15 (50)	3.3
Namgajwa	2(9)	0(0)	7(29)	2(9)	2(7)	1(4)	0(0)	0(0)	1(3)	15 (61)	4.1
Oryu	8(31)	5(27)	0(0)	0(0)	7(27)	17(74)	1(3)	3(10)	9(35)	50 (207)	4.1
Pangi	9(32)	13(57)	1(3)	16(70)	7(25)	23(100)	10(39)	22(92)	14(54)	115 (472)	4.1
Pulgwang	0(0)	0(0)	1(5)	2(7)	1(4)	4(15)	2(11)	11(42)	8(30)	29 (114)	3.9
Ssangmun	1(3)	1(3)	19(91)	0(0)	5(18)	14(59)	10(40)	24(107)	24(106)	98 (427)	4.4
Shinsol	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	4(14)	0(0)	0(0)	4(17)	0(0)	8 (31)	3.9
Sungsu	6(22)	5(17)	1(3)	0(0)	12(49)	15(71)	5(18)	11(51)	18(71)	73 (302)	4.1
Tacchi	0(0)	3(11)	2(9)	1(3)	0(0)	2(6)	0(0)	9(42)	15(61)	32 (132)	4.1
Total Cases (Hours)	35 (132)	45 (195)	89 (370)	102 (444)	59 (217)	149 (626)	48 (179)	150 (613)	160 (638)	837 (3,414)	4.1

* The average consecutive hours during an ozone episode=total hours/total cases

동과 구로동보다 많았다. 이러한 현상은 서울 서부 지역의 오존 전조물질이 서풍의 영향으로 동부지역으로 이동하여 광화학 반응에 의해 오존을 생성하기 때문이다(김영성, 1997; 이종범과 방소영, 1997;

정용승과 정재섭, 1991).

표 3에는 전국 16개 시·도지역의 한 측정지점당 오존에피소드 건수와 총 지속시간을 제시하고 있다. 도표의 마지막 열에는 한 건의 에피소드 발생

Table 3. The summary of ozone episodes for the period 1989~1997 in Korea. The table contains the number of day with ozone concentration exceeding 80 ppb for 3 consecutive hours.

[Total cases for a site (Total hours for a site)]

Monitoring Sites	'89	'90	'91	'92	'93	'94	'95	'96	'97	Total Cases (Hours)	Hours /Cases ^d
Seoul	1.8 (6.6)	2.3 (9.8)	4.5 (18.5)	4.9 (21.1)	3.0 (10.9)	7.5 (31.3)	2.4 (9.0)	7.5 (30.7)	8.0 (31.9)	41.9 (130.8)	4.1
Kyonggy	0.5 (1.8)	0.7 (2.8)	4.6 (20.3)	2.9 (11.0)	0.8 (2.8)	5.6 (24.9)	0.4 (1.4)	0.2 (0.6)	4.8 (23.1)	20.5 (88.5)	4.3
Inchcon	0 (0)	0 (0)	3.3 (11.3)	0.7 (2.3)	0.3 (1.3)	2.0 (10.7)	0 (0)	0 (0)	0.3 (1.0)	6.6 (26.6)	4.0
Taejeon	0.5 (1.5)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0.3 (1.3)	0 (0)	0 (0)	3.7 (15.7)	5.7 (23.7)	10.2 (42.2)	4.1
Taegu	1.7 (8.3)	0.6 (2.4)	0.2 (0.6)	0 (0)	1.4 (5.2)	0.4 (1.8)	0.8 (3.0)	3.0 (12.0)	3.5 (13.0)	11.6 (46.3)	4.0
Pusan	0.2 (0.5)	0.4 (2.6)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1.0 (4.0)	0 (0)	0.7 (2.6)	2.0 (7.7)	4.3 (17.4)	4.0
Ulsan	0.4 (1.6)	0.1 (0.4)	0.1 (0.4)	0 (0)	0.6 (2.0)	0.1 (0.4)	0 (0)	0 (0)	0.6 (2.0)	1.9 (6.8)	3.6
Kwangju	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0.3 (1.0)	0.7 (2.0)	2.0 (7.3)	3.0 (10.3)	3.4
Kangwon	0 (0)	1.0 (5.3)	0 (0)	0.7 (2.0)	0 (0)	0 (0)	1.5 (8.0)	3.3 (15.3)	4.3 (18.0)	10.8 (48.6)	4.6
Kyongbuk	1.0 (3.0)	0.3 (2.0)	0.5 (2.5)	0 (0)	2.0 (7.8)	3.6 (17.6)	1.0 (3.5)	3.5 (13.7)	5.0 (25.7)	16.9 (75.8)	4.5
Kyongnam	-	-	0 (0)	0 (0)	0 (0)	2.0 (9.0)	2.5* ^c (49.3)	3.5 (8.8)	1.5 (5.9)	9.5* ^c (73.0)	7.7* ^c
Chungbuk	0 (0)	0 (0)	1.5 (6.0)	0.5 (2.0)	0.5 (1.5)	0.7 (3.0)	0 (0)	3.0 (9.7)	2.5 (11.8)	8.7 (34.5)	4.0
Chungnam	-	-	-	-	-	-	1.0 (3.7)	2.0 (9.0)	4.3 (20.8)	7.3 (33.5)	4.7
Cheonbuk	0 (0)	0.5 (1.5)	1.0 (4.5)	0 (0)	0 (0)	0 (0.0)	0 (0)	0 (0)	0.7 (2.0)	2.2 (8.0)	3.6
Cheonnam	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0.5 (1.5)	0.3 (1.0)	2.3 (9.0)	2.3 (9.0)	6.0 (26.8)	4.9 (19.3)	16.3 (66.6)	4.1
Cheju	-	-	-	-	-	-	4.5 (21.0)	2.0 (8.5)	0 (0)	6.5 (29.5)	4.5
Total	6.1 (23.3)	5.9 (26.8)	15.7 (64.1)	10.2 (39.9)	9.2 (33.8)	25.2 (111.7)	16.7 (108.9)	39.1 (155.4)	50.1 (213.2)	178.2 (728.4)	4.3

The average consecutive hours during an ozone episode=total hours/total cases.

*^c Since high level ozone over 80 ppb was observed continuously from 3 p.m. of February 16 to 12 p.m. (LST) of February 24, 1995 at Kyonghwa-Dong site in Jinhae-city Kyongnam, this site was estimated longer consecutive hours during an ozone episode than other sites. We think it had the error of analyzer that time, we can't confirm the above occurrence

시 지속된 시간을 나타낸다. 한 측정지역에서 연간 발생된 오존에피소드는 서울이 9년간 총 41.4회로 가장 많았으며, 경기 20.5회, 경북 16.9회, 전남 16.3회가 발생되었다. 연도별 추이를 보면, 서울지역은 '94년 측정지점당 7.5회 오존에피소드가 발생하였으며, '95년 한 측정지점에서 2.4회, '96년 7.5회, '97년 8회 오존에피소드가 발생되어, 한 측정지점당 오존에피소드 발생건수는 '95년을 제외하고 계속적으로 증가 추세에 있다. 경기지역은 '94년, '97년 각각 에피소드 발생이 한 측정지점 당 5.6회와 4.8회를 기록하였다. 강원도 지역은 '95년 에피소드 발생이 한 지점당 1.5회, '96년 3.3회, '97년 4.3회 발생하여 매년 증가하고 있다. 대전지역과 충남지역에서는 '97년 각각 측정지점당 5.7회와 4.3회로 분석되었으며, 전남지역의 경우, '95년 측정지점당 2.3회, '96년 6회, '97년 4.9회로 발생되었다. 따라서, 전국적으로 한 측정지점 당 오존에피소드 발생건수는 매년 증가하고 있는 것으로 분석되었다. 한편, 서울의 경우 '89년부터 '97년까지 9년간 한 측정지점에서 발생된 에피소드 건수가 41.9회, 총 130.8시간으로 분석되어 한 건의 에피소드 발생시 4.1시간이 지속되었다. 경남지역의 경우, 한 건의 에피소드 발생시 평균 7.7시간 동안 지속된 것으로 분석되었는데, 이와 같이 장시간이 기록된 이유는 경남 진해 경화동 측정지점에서 '95년 2월 16일 15시부터 2월 24일 24시까지 계속적으로 80ppb 이상의 고농도가 기록되었기 때문인데, 아마 측정기기에 문제가 있었던 것으로 생각되나, 확인할 수가 없었다. 이는 분석기로부터 얻은 자료의 신뢰성을 점진하는 체계적 과정이 아직 마련되지 않은 상태에서 자료가 공개되고 있기 때문이다. 전국의 한 측정지점에서 한 건의 에피소드 발생시 평균 약 4.3시간이 지속된 것으로 분석되었다.

4. 대기 환경기준과 농도산정법의 비교 검토

4.1 미국 EPA의 대기 환경기준

우리나라는 오존환경기준을 1시간 평균 100ppb와 8시간 평균 60ppb로 규정하고 있으며, 미국 EPA에서는 1997년 7월 오존에 대한 NAAQS(national ambient air quality standard)로 기존 기준치를 8시간 평균 80ppb로 개정한 바 있다. 영국도 8시간 기준에 대해 50ppb로 규정하고 있으며, WHO는 8시간 기준치를 50~69ppb로 규정하고 있다(AEA Tech., 1998). 각국의 오존농도 기준치는 표 4와 같다.

미국의 EPA는 1977년 이래 최소 5년마다 기존의 대기 환경기준이 공공보건과 환경에 대한 위해성을 예방할 수 있는지를 과학적으로 검토하고 있다. 이러한 검토과정은 합법적이고 공식적인 것으로, 해당 오염물질의 인체 및 환경에 미치는 영향에 관한 과학적 평가서인 "criteria document"와 이 정보를 실제 정책결정에 활용하도록 해석하고 분석한 "staff paper"가 작성된다. 매우 엄격한 과학적 평가 과정을 거쳐 작성된 두 문서가 실제 정책자료로 활용되기까지 과학적·기술적 전문가로 구성된 청정공기과학자문위원회(Clean Air Scientific Advisory Committee: CASAC)에 의해 면밀한 검토단계를 거친다. CASAC은 적절한 대기 환경기준을 EPA에 추천하고, EPA는 환경기준 개정이 적절한지를 판단하고 있다(Nichols, 1997).

미국의 EPA는 1979년 오존의 대기 환경기준을 1시간 기준치 120ppb로 개정한 이후, 동물실험연구, 제한된 인체에의 노출 연구, 필드실험연구, 오존농도와 호흡계 질환 환자와의 상관연구 등 다각적인 판

Table 4. The ambient air quality standard for O₃ of each country.

[Unit : ppb]

Criteria Based on	Korea	U S.A.	UK	Japan	Canada	Italy	WHO
Hourly Average	100	-	-	60	82	100	80~100
8 Hour Average	60 (Block Average)	80 (Running Average)	50 (Running Average)	-	-	-	50~60 (Running Average)
24 Hour Average	-	-	-	-	25	-	-

학적 연구를 수행하였고, 8시간 평균 기준치가 장시간 폭로로 인한 인체 및 환경에 대한 영향을 예방하기 위해 양호한 개념이라고 결론을 내린 바 있다 (Wolff, 1996). 즉, 미국의 EPA는 최근 3년간의 연간 일일 최고 8시간 평균농도 중 상위 4번째 농도를 평균한 값이 80 ppb를 초과할 때, 해당지역을 미달성 지역으로 설정하고 있으며, 기존의 1시간 단기초과기준에서 인체의 영향에 직접적인 관련이 있는 기준으로 개정하여, 8시간 기준 80 ppb가 오존으로부터 인간을 안전하게 방어할 수 있는 한계치라는 결론을 내렸다. 또한, 8시간 환경기준 달성이 동식물을 비롯한 재산상 피해도 보호할 수 있다고 판단하여 1, 2차 기준을 동일하게 설정하였다 (USEPA, 1997).

4.2 우리나라와 미국의 8시간 평균 오존 농도 산정법 비교

우리나라와 미국은 오존의 8시간 평균농도 산정 방법에 차이가 있다. 우리나라의 8시간 평균 농도는 하루 24시간을 8시간 간격(1시~8시, 9시~16시, 17시~24시)인 3개 단위군으로 구분한 후, 각 단위의 농도를 단순 산술평균하는 방법을 사용하고 있으며, 일본의 경우도 우리와 같다. 한편, 미국의 EPA는 8시간 이동평균(running 8-hour average) 농도를 하루 24번 연속적으로 산정하는 방식을 이용하며, 산정된 값은 8시간 중 첫 번째 혹은 출발시간의 해당 일(day)에 포함하도록 한다. 우리나라는 8시간 중 5시간 이상(62.5% 이상), 미국은 6시간 이상(75% 이상)된 경우만을 유의한 자료로 인정한다. 단, 미국의 경우, 8시간 중 6시간 미만으로 자료가 확보된 경우일지라도 기준치 80 ppb를 초과하면 8시간 평균농도값으로 인정된다. 미국 EPA는 8시간 평균 오존농도산정시 소수점 세째자리까지 ppm 단위로 표현하였고, 소수 세째자리에서 반올림한다. 본 연구는 편이상 ppb 단위로 표현하였으며, 오존농도가 80 ppb를 초과하면 초과한 것으로 분석하였다.

본 연구는 우리나라와 미국의 8시간 평균오존농도 산정기준에 입각하여, 전국 대기오염 자동측정망 지점에 대하여 최근 3년간('95~'97) 8시간 평균 오존농도를 산정하였다. 표 5와 표 6은 두가지 방법으로 8시간 평균 오존농도를 산정한 결과로써, 60 ppb (우리나라의 8시간 오존농도기준치) 초과건(exce-

dance case)수와 초과일(exceedance day)수를 비교한 것과 80 ppb(미국의 8시간 오존농도 기준치) 초과건수와 초과일수를 상호 비교하여 제시하였다. 이와 같은 시도는 두 나라의 오존기준치를 적용하여 실제 우리나라의 오존농도 수준을 파악하고, 현실성 있는 오존기준치를 살펴보고자 시행한 것이다. 초과건수는 8시간 평균농도가 오존기준치(60 ppb와 80 ppb) 보다 큰 값을 가졌을 경우를 1회로 하였으며, 초과건수가 1회 이상 발생한 날을 1건의 초과일로 정의하였다. 표 5에서, 우리나라의 산정기준에 의하면 3년 동안 60 ppb 초과건수는 서울지역 총 239회 212일, 경기지역 총 71회 65일, 전남지역 150회 122일, 경북지역 130회 104일, 제주도 95회 74일, 전국 총 970회 805일이 기록되었다. 전국적으로 초과일당 1.2회 정도가 기준치 60 ppb를 초과한 것으로 분석되었다. 반면, 미국의 산정기준에 의하면, 서울 총 3,343회 720일, 경기지역 총 1,464회 334일, 전남지역 총 1,749회 330일, 경북지역 1,606회 301일, 제주도 832회 130일, 전국적으로 총 13,886회 2,894일로 조사되었다. 전국적으로, 초과일당 약 4.8회 정도의 초과건수를 나타낸 것으로 분석되었다. 연도별 추이를 보면, 우리나라의 산정기준에 의한 경우, 전국적으로 총 '95년 172회 125일, '96년 317회 276일, '97년 481회 404일로 60 ppb를 초과하였다. 반면, 미국의 산정방법에 의한 결과는 '95년 2,255회 432일, '96년 4,747회 1,010일, '97년 6,884회 1,452일로 우리의 산정방법과 커다란 차이를 보였다.

한편, 표 6에서 오존농도 80 ppb 초과건수와 초과일수를 살펴보면, 우리나라의 산정법에 준한 경우, 서울 21회 19일, 경기 5회 5일, 전남 8회 7일, 경남 23회 9일, 경북 10회 10일, 전국 79회 62일로 나타났다. 전국적으로 초과일 당 약 1.3회의 초과건수가 발생하였다. 반면, 미국의 산정방법에 의한 경우, 서울 434회 115일, 경기 147회 40일, 전남 136회 36일, 경남 227회 20일, 경북 126회 38일, 전국적으로 1,374회 335일이 80 ppb를 초과하였으며, 초과일당 4.1회 초과건수가 나타났다. 또한, 연도별 추이도 오존농도 60 ppb 초과건수와 마찬가지로 큰 차이가 있었다. 실제, 1년 중 고농도 오존 발생이 단 몇 개월 동안만 발생되기 때문에, 우리나라의 8시간 오존기준(60 ppb와 80 ppb) 초과건수는 크게 우려할 만 하며, 단기간 오존기준치 초과보다 장시간의 오존 측

Table 5. The number of cases and days with 8-hour average O₃ concentration exceeding the 60 ppb from 1995 to 1997 in Korea. The 60 ppb is currently a Korean standard. [Number of cases (Number of days)]

Site	Korean Method				USEPA Method			
	1995	1996	1997	Total	1995	1996	1997	Total
Seoul	24(19)	88(83)	127(110)	239(212)	444(103)	1,395(297)	1,504(320)	3,343(720)
Kyunggy	4(4)	15(14)	52(47)	71(65)	135(36)	336(81)	993(217)	1,464(334)
Incheon	1(1)	1(1)	0(0)	2(2)	10(1)	13(3)	37(10)	60(14)
Taejeon	1(1)	16(14)	14(10)	31(25)	32(8)	282(57)	214(47)	528(112)
Taegu	2(2)	3(3)	10(10)	15(15)	103(28)	159(48)	237(53)	499(129)
Pusan	0(0)	24(22)	20(18)	44(40)	0(0)	252(52)	256(59)	508(111)
Ulsan	0(0)	1(1)	3(3)	4(4)	3(1)	47(16)	55(19)	105(36)
Kwangju	0(0)	0(0)	9(8)	9(8)	13(3)	23(8)	173(42)	209(53)
Kangwon	11(8)	14(13)	11(11)	36(32)	127(22)	288(65)	321(75)	736(162)
Kyungbuk	8(8)	15(15)	107(81)	130(104)	160(42)	299(63)	1,147(196)	1,606(301)
Kyungnam	26(11)	10(8)	21(19)	57(38)	340(44)	236(47)	321(72)	897(163)
Chungbuk	1(1)	4(3)	13(11)	18(15)	4(1)	153(40)	182(41)	339(82)
Chungnam	31(21)	8(6)	26(18)	65(45)	277(43)	133(32)	358(64)	768(139)
Cheonbuk	1(1)	0(0)	3(3)	4(4)	5(1)	55(16)	183(61)	243(78)
Cheonnam	23(21)	63(51)	59(50)	150(122)	293(52)	639(121)	817(157)	1,749(330)
Cheju	34(27)	55(42)	6(5)	95(74)	309(47)	437(64)	86(19)	832(130)
Total	172 (125)	317 (276)	481 (404)	970 (805)	2,255 (432)	4,747 (1,010)	6,884 (1,452)	13,886 (2,894)

Table 6. The number of cases and days with 8-hour average O₃ concentration exceeding the 80 ppb from 1995 to 1997 in Korea. The 80 ppb is currently an U.S.A standard. [Number of cases (Number of days)]

Site	Korean Method				USEPA Method			
	1995	1996	1997	Total	1995	1996	1997	Total
Seoul	2(1)	5(5)	14(13)	21(19)	41(10)	180(53)	213(52)	434(115)
Kyunggy	0(0)	0(0)	5(5)	5(5)	1(1)	32(9)	114(30)	147(40)
Incheon	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)
Taejeon	0(0)	1(1)	0(0)	1(1)	0(0)	10(2)	19(7)	29(9)
Taegu	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	2(1)	11(5)	18(5)	31(11)
Pusan	0(0)	1(1)	1(1)	2(2)	0(0)	28(9)	11(4)	39(13)
Ulsan	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	2(2)	2(2)
Kwangju	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	7(2)	7(2)
Kangwon	0(0)	0(0)	1(1)	1(1)	20(4)	31(9)	23(7)	74(20)
Kyungbuk	0(0)	1(1)	9(9)	10(10)	1(1)	12(4)	113(33)	126(38)
Kyungnam	23(9)	0(0)	0(0)	23(9)	197(10)	14(4)	16(6)	227(20)
Chungbuk	0(0)	0(0)	1(1)	1(1)	0(0)	0(0)	23(7)	23(7)
Chungnam	1(1)	1(1)	3(3)	5(5)	24(6)	12(3)	40(10)	76(19)
Cheonbuk	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)
Cheonnam	1(1)	3(2)	4(4)	8(7)	11(3)	53(14)	74(18)	136(36)
Cheju	1(1)	1(1)	0(0)	2(2)	15(2)	6(2)	0(0)	21(4)
Total	28(13)	13(12)	38(37)	79(62)	312(38)	389(114)	673(183)	1,374(335)

적어 심각한 것으로 나타났다. 참고로 앞서도 언급하였지만, 전국 측정지점의 숫자가 1995년 91개소에서 1997년 114개로 증가하였기 때문에 연도별 오존기준치 초과건수는 그 자체 과대평가된 것이

다. 본 연구의 목적이 기준농도의 산정법을 비교평가하는 것인 만큼, 초과건수 및 초과일수의 증가현상은 중요성이 받감된다.

우리나라와 미국의 8시간 오존농도 산정방법을

비교한 결과, 우리나라의 산정방법이 미국방법에 비해 초과건수가 약 10여배 이상 작았으며, 초과일도 3.5배 이상 작은 것으로 조사되었다. 미국방법에 의하여 산정된 연간 8시간 평균값의 총 대상자료수(8,760개)가 우리나라 방법에 의한 총 대상자료수(1,095개)보다 8배 많으므로, 미국방법에 준한 초과건수가 월등히 증가하는 것은 당연하지만, 우리의 계산법은 오존농도가 낮은 시간대를 일괄 포함하여 평균하였기 때문에 계산된 농도 자체가 비과학적이며, 오존 오염도를 과소평가할 수 있다.

우리나라의 대기 환경기준에 의하면 단기기준을 년 3회 이상 초과해서는 안된다. 그러나, 표 5와 표 6에서 미국식 산정방법에 의하면 우리나라 전역에서 기준치 60 ppb는 물론 80 ppb 초과건수도 매우 빈번하다는 것을 알 수 있다. 따라서, 우리나라 대부분 지역의 오존수준은 안심할 단계가 아니며, 오존 저감대책이 조속히 마련되어야 할 시점이다. 또한, 우리나라의 오존에 대한 기준치도 행정목표치가 아닌 국민의 건강과 재산상 피해를 고려한 현실성 있는 기준으로 개정되어야 할 것이다.

한편, 우리나라의 8시간 기준의 개념은 8시간 평균 오존농도가 기준치 60 ppb 초과여부로 판단되지만, 미국 EPA는 최근 3년간의 연간 일최고 8시간 평균농도 중 상위 4번째 값들을 평균하여 80 ppb를 초과할 때 해당지역을 미달성 지역으로 설정하고 있다. 이러한 개념은 고농도가 일정기간 이상 지속되어도 전체적으로 낮은 농도치의 고빈도(high frequency)에 의해 오염물질의 평균농도를 왜곡하는 현상을 방지할 수 있다. 실제, 미국 EPA에서 최근 3년간 일최고 8시간 기준농도 초과 여부를 판정할 때, 0.084 ppm은 0.08 ppm 기준을 초과하지 않은 것으로 인정한다. 그러나 본 연구에서는 오존농도를

ppb 단위로 표현하여 오존농도가 80 ppb를 초과하면 기준치 초과로 분석하였다. 이러한 분석은 향후, 오염물질 농도 표기가 ppb 단위로 표현되는 것이 바람직하기 때문에 이와 같은 시도를 하였다. 또한, 미국은 일자료확보율이 75% 이상(8시간 평균농도 산정건수가 18~24개 확보)인 경우만을 유효한 것으로 하였으며, 비록 자료확보율이 75% 미만이지만 일최고 8시간 평균오존농도가 80 ppb를 초과하면 그 날의 자료는 유효한 것으로 인정한다. 또한, 연간 일최고 8시간 평균농도 중 상위 4번째 값을 결정할 때, 연간 자료확보율이 75%(365일 중 274일 이상의 일자료 확보) 이상된 경우만을 연간 자료로 인정한다. 단, 연간 자료확보율이 75% 미만이지만 연간 일최고 8시간 평균농도 중 상위 4번째 값이 기준치 80 ppb 이상이면 그 값을 인정하고 있다. 이와 같은 산정기준을 적용하여 해당지역의 미달성 여부를 결정한다. 미국방법으로 3년간의 연간 일최고 8시간 평균농도 중 상위 4번째 농도를 평균한 값이 기준치 80 ppb를 만족하는지 여부를 국내 자료를 이용하여 검토하였다. 표 7은 서울 쌍문동의 오존자료('95~'97)에 적용한 예로써, 도표에는 상위 4번째 농도 뿐만 아니라, 상위 1, 2, 3, 5번째 오존 농도도 함께 제시하였다. 쌍문동의 경우, 연간 자료확보율 75%를 만족하였으며, '95년, '96년 및 '97년의 상위 4번째 값이 각각 83.3 ppb, 93.0 ppb, 97.0 ppb로 3년 평균값이 91.1 ppb로 분석되었다. 미국 EPA 기준에 의하면, 이 지역은 오존의 대기환경기준 80 ppb를 만족하지 못한 미달성지역으로 결정된다.

4.3 오존의 공간분포

앞에서 언급하였듯이 미국 EPA가 최근 3년간의 연간 일최고 8시간 평균농도 중 상위 4번째 농도를

Table 7. An example of 8-hour average concentration based on the USEPA method applied at the Ssangmun-Dong monitoring site in Seoul.

Year	Percent Valid Days	1st Highest Daily Max 8-hour Conc. (ppb)	2nd Highest Daily Max 8-hour Conc. (ppb)	3rd Highest Daily Max 8-hour Conc (ppb)	4th Highest Daily Max 8-hour Conc (ppb)	5th Highest Daily Max 8-hour Conc (ppb)
1995	91.0%	95.4	92.5	89.6	83.3	80.3
1996	97.5%	107.8	102.8	96.9	93.0	90.8
1997	96.4%	117.3	115.6	113.3	97.0	91.9
Average	95.0%	106.8	103.6	99.9	91.1	87.6

Table 8. The 3-year average of the annual 4th-highest daily maximum 8-hour ozone concentration in Korea.

Monitoring Site			Ozone Concentration, ppb (The Percent of Valid Days, %)			
			1995	1996	1997	Average
Seoul	Banpo		58 (88)	66 (99)	82 (97)	69 (95)
	Chamsil		71 (90)	75 (82)	66 (89)	71 (87)
	Hannam		52 (81)	68 (80)	81 (99)	67 (87)
	Hwagok		45 (90)	62 (90)	59 (97)	55 (92)
	Kirum		62 (87)	72 (86)	80 (88)	71 (87)
	Kuuu		75 (91)	90 (100)	95 (95)	87 (95)
	Kwanghwamun		55 (95)	54 (89)	68 (94)	59 (92)
	Kwanaksan		48 (92)	77 (93)	70 (96)	65 (93)
	Mapo		50 (89)	60 (82)	63 (93)	57 (88)
	Mullae		43 (95)	58 (91)	64 (97)	55 (95)
	Myonmok		57 (81)	69 (85)	75 (83)	67 (83)
	Nangajwa		40 (80)	51 (85)	57 (94)	49 (86)
	Oryu		57 (82)	64 (93)	73 (99)	64 (91)
	Pangi		79 (89)	92 (97)	78 (99)	83 (95)
	Pulgwang		63 (92)	76 (83)	76 (84)	72 (86)
	Ssangmun		83 (91)	93 (98)	97 (97)	91 (95)
Sungsu		67 (90)	82 (94)	85 (99)	78 (94)	
Taechi		55 (83)	82 (86)	83 (93)	73 (87)	
Kyonggy	Suwon	In-gyc	67 (76)	82 (47)	75 (89)	75 (71)
	Sungnam	Dandae	48 (84)	66 (87)	81 (84)	65 (85)
	Anyang	Anyang	51 (78)	54 (83)	81 (86)	62 (82)
	Ansan	Hogye	53 (93)	58 (89)	70 (95)	60 (92)
	Kwanchon	Wonshu	47 (94)	64 (85)	61 (91)	58 (90)
Incheon	Pyoryang		51 (78)	66 (91)	75 (88)	64 (86)
	Sungu		51 (88)	43 (83)	60 (86)	51 (85)
Taejeon	Pupyong		38 (91)	58 (89)	61 (84)	52 (88)
	Taehwa		67 (89)	79 (97)	72 (87)	73 (91)
	Taehung		57 (82)	66 (87)	84 (87)	69 (86)
Taegu	Kusung		37 (89)	50 (97)	67 (94)	51 (93)
	Samduk		55 (93)	74 (95)	65 (93)	65 (94)
	Taemyong		66 (94)	66 (96)	55 (98)	62 (96)
	Sangyeok		49 (91)	64 (91)	74 (85)	62 (89)
Pusan	Nowon		56 (97)	61 (86)	77 (89)	65 (91)
	Kwangbok		56 (92)	71 (86)	74 (96)	67 (91)
	Pomcheon		44 (98)	64 (91)	61 (90)	56 (93)
	Taeyon		51 (95)	81 (90)	55 (93)	62 (93)
	Kangjin		36 (91)	62 (93)	55 (86)	52 (90)
	Tokcheon		46 (96)	66 (92)	66 (98)	60 (95)
Ulsan	Shinpyong		46 (91)	81 (87)	66 (89)	64 (89)
	Sungnam		40 (95)	61 (81)	59 (93)	53 (90)
	Gaeun		41 (91)	63 (91)	43 (93)	49 (92)
Kwangju	Yecheon		46 (90)	64 (88)	50 (95)	53 (91)
	Nongsong		47 (89)	38 (89)	54 (90)	46 (89)
	Tuam		54 (94)	63 (96)	65 (90)	61 (93)
Kwagwon	Songjeong		58 (88)	57 (82)	78 (90)	64 (87)
	Wonju	Myeongryun	59 (91)	62 (95)	72 (93)	64 (93)
	Chunchon	Choun	100 (88)	94 (84)	71 (92)	88 (88)

Table 8. To be continued.

Monitoring Site			Ozone Concentration, ppb (The Percent of Valid Days, %)			
			1995	1996	1997	Average
Kyungbuk	Pohang	Chunghung	48 (84)	58 (87)	92 (87)	66 (86)
		Chukto	61 (97)	62 (96)	64 (97)	63 (97)
	Kimcheon	Pyonghwa	59 (93)	46 (96)	48 (96)	51 (95)
		Kumi	51 (88)	76 (85)	63 (84)	64 (86)
		Wonpyeong	62 (89)	69 (90)	59 (85)	63 (88)
Kyungnam	Masan	Hoewon	64 (96)	69 (92)	74 (93)	69 (93)
		Myongseo	48 (100)	57 (86)	50 (93)	52 (93)
	Changwon	Ungnam	49 (96)	43 (90)	41 (91)	44 (92)
		Jinhac	Kyonghwa	123 (75)	80 (90)	72 (80)
Chungbuk	Cheongju	Songjeong	47 (86)	69 (93)	66 (86)	61 (89)
		Chungin	54 (86)	76 (76)	75 (76)	68 (80)
	Checheon	Seobu	36 (93)	58 (88)	61 (97)	51 (92)
Chungnam	Cheonan	Wonsung	65 (87)	72 (95)	77 (92)	71 (91)
		Seosan	Tongmun	88 (49)	56 (76)	79 (76)
Chonbuk	Jeonju	Palbok	46 (95)	65 (82)	68 (80)	60 (86)
		Kunsan	Chungang	42 (95)	62 (98)	58 (75)
	Iksan	Namchung	49 (90)	63 (97)	65 (90)	59 (92)
Cheonnam	Mokpo	Yongdang	79 (89)	78 (95)	78 (95)	79 (93)
		Yeosu	Kwangmu	64 (86)	90 (90)	81 (92)
	Yeocheon	Samil	69 (92)	69 (93)	71 (94)	70 (93)
Cheju	Cheju	Imo	70 (92)	70 (85)	67 (93)	69 (90)

평균한 값이 오존기준치 80 ppb를 초과할 때 해당 지역을 미달성 지역으로 지정하는 기준을 우리나라 전국 측정지역에 적용하였다. 최근 3년간('95~'97)의 연간 자료확보율 75% 이상을 만족한 측정소는 총 68개 지점이었다. 표 8에 서울을 비롯한 전국 측정지점의 연간 일최고 8시간 평균농도 중 상위 4번째 농도와 3년간의 평균농도를 제시하였다. 서울 구의동, 방이동, 쌍문동 등 3개 지역과 강원도 춘천의 조운동, 경남 진해의 경화동이 기준치 80 ppb를 초과하는 오존기준 미달성지역으로 조사되었다. 서울 지역의 경우, 쌍문동이 91 ppb로 전국에서 가장 높은 오존 발생지역으로 매년 오존농도가 증가하여, 오존 문제가 상당히 심각한 지역으로 파악되었다. 한강 하류지역인 동부지역에 위치한 구의동은 87 ppb로 고농도 오존 발생지역으로 분석되었다. 한편, 고농도 오존에피소드가 가장 빈번히 발생한 방이동은 83 ppb로 나타났는데, 이 지역은 최고 수준의 농도가 간헐적으로 출현했다기 보다는 80 ppb 정도 수준의 오존이 비교적 지속적으로 장기간 발생한 것

으로 파악되었다. 동부지역의 성수동은 비록 오존기준치 80 ppb를 초과하지는 않았지만 78 ppb를 기록하였으며, 매년 오존농도가 증가하는 추세에 있었다. 서울 남서부지역에 위치한 공업지역인 구로동과 북동지역의 신설동은 연간 자료확보율 75%를 만족하지 못하였으므로 분석에서 제외되었다.

경남 진해의 경화동은 주거지역이면서 92 ppb로 서울의 쌍문동과 더불어 전국 최고의 고농도 오존 측적이 있었던 지역으로 조사되었다. 이 지역은 '95년 농도가 123 ppb '96년 80 ppb, '97년 72 ppb로 일최고 8시간 평균농도 중 상위 4번째 농도는 감소하는 경향을 나타내고 있었다. 앞 절에서도 언급하였듯이 '95년 수치가 높은 것으로 분석된 이유는 경남 진해 경화동 측정지점에서 '95년 2월 16일 15시부터 2월 24일 24시까지 계속적으로 80 ppb 이상의 고농도가 기록되었기 때문인 것으로, 아마 측정기기에 문제가 있었던 것으로 생각되나, 확인할 수가 없었다. 강원도 춘천시 조운동은 상업지역으로 오존농도 88 ppb가 조사되었다. 서울과 수도권지역에 인접

한 이 지역의 고농도 오존 발생 현상은 서울과 경기 서남부지역의 공업지대와 도심지역으로부터 오존의 전조물질이 풍하지역으로 이동하여 고농도 오존을 생성시킨 것으로 사료된다. 그 밖에 상업지역인 수원의 인제동은 75 ppb, 충남 서산의 동문동은 74 ppb, 전남의 목포 용당동과 상업지역인 여수의 광무동에서도 각각 79 ppb로 관측되었다.

본 연구에서는 최근 3년간의 연간 일최고 8시간 평균농도 중 상위 4번째 값의 평균오존농도 분포를 파악하고자 전국 측정지점의 오존농도를 공간분석하였다. 공간분석법 (spatial analysis)이란 동일시간에 지역적으로 상이한 측정지점에서 측정된 자료를 한 평면 상에서 시각적으로 평가할 수 있다. 최근까지 공간분석에서 가장 선호하고 있는 내삽방법으로는 거리 반비례 평균법 (inverse distance weighted averaging)과 kriging법 등이 있다 (윤훈주와 김동술, 1997). 최근 공간분석법은 지리정보 시스템 (GIS: geographic information system)과 함께 응용되고 있다. GIS란 기본자료에 응용하고자 하는 자료를 중첩시켜, 공간자료를 효율적으로 분석 및 조작하기 위한 수치자료 처리방법으로 자료의 입력과 분석된 자료의 출력에 관계된 장치들을 총칭한다 (Tomlinson, 1972). 본 연구에서는 최근 환경분야에 많이 이용되고 있는 거리 반비례 평균법을 응용하였으며, 자료의 효율적 분석과 시각적 효과를 얻기 위하여 GIS 소프트웨어인 ArcView 3.0을 이용하였다.

측정소가 위치하지 않은 지역 (미측정지점)의 오존농도 값은 측정소가 위치한 지역 (측정지점)의 오존농도에 대한 가중 평균에 의하여 계산된다.

$$Z = \sum_{i=0}^1 W_i Z_i \tag{1}$$

여기서, W_i = 거리가중치,

Z_i = 측정된 오존농도

Z = 예측된 오존농도

이 때, 측정된 오존농도에 대한 가중치 W_i 는 예측하고자 하는 지점에서 주변의 측정지점까지 거리에 의하여 계산된다.

$$W_i = \frac{d_i^k}{\sum_{i=0}^1 d_i^k} \tag{2}$$

여기서, W_i = 거리가중치

k = 중심가중치

d_i = 주변의 측정지점 i 까지의 거리

예측 오존농도는 미측정지점에서 가까운 측정지점의 농도값에 크게 영향을 받고 멀리 떨어져 있는 측정지점의 오존농도로 부터는 상대적으로 영향을 덜 받게 된다

그림 1은 전국의 연간 일최고 8시간 평균농도 중 상위 4번째 오존농도의 3년 평균 값에 대한 공간분포도를 나타낸 것이다. 서울의 오존농도 분포는 그림 2에 자세히 확대하여 표시되었다. 수원, 안양 및 과천 등의 경기 남부지역과 경기 북부 지역이 오존농도 66~75 ppb였다. 춘천을 포함한 인근지역에서 오존농도 86~91 ppb였으며, 강원 서북부 지역이 76~80 ppb로 분석되었으나, 이 지역에는 측정소가 있지 않아 공간 분석시 춘천의 오존농도에 크게 영

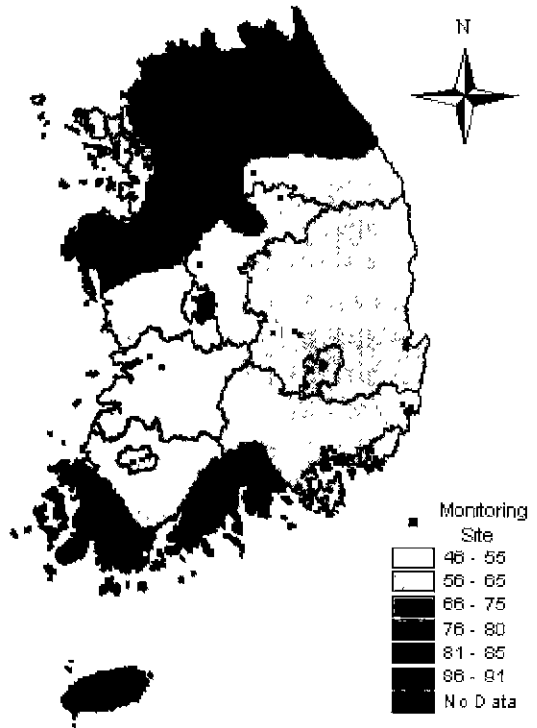


Fig. 1. Spatial interpolation map for the 3-year ('95 ~ '97) average of annual 4th-highest daily maximum 8-hour ozone concentration in Korea.

향을 받았다. 대전의 서부지역은 66~75 ppb 범위였으며, 전남의 목포, 여천, 여수 일대의 남부지역도 비슷한 농도분포가 나타났다. 울산 지역은 46~55 ppb의 오존분포로 전국에서 가장 낮은 분포를 나타냈다. 특히, 청정지역으로 고려되어 온 제주도는 오존 농도 66~75 ppb로 분석되었다. 참고로 공간분석시, 전국의 측정지점이 일정한 간격으로 배치된 것이 아니므로 측정소의 수가 작은 지역은 밀집지역보다 커다란 불확실도를 가지고 있다.

특히, 장시간의 고농도 오존 발생이 가장 심각한 서울의 오존오염 공간분포 분석은 그림 2에 제시하였다. 서울의 고농도 오존은 크게 2개 지역에서 관측되고 있는데, 첫째 지역은 방이동, 성수동, 구의동이 위치한 한강의 동부지역이며, 두번째 지역은 쌍문동과 불광동을 포함한 동북부지역으로, 공업지역 및 교통혼잡 지역보다도 매우 높은 농도가 관측되

는 것으로 분석되었다. 오존은 2차 오염물질로서 기온이 높을 수록, 오존 전조물질의 축적이 클 수록, 풍속이 작을 수록, 일사량이 풍부할 수록, 상대습도가 낮을 수록 고농도를 보이는데, 서울의 동부지역 및 북동부지역은 이와 같은 요건을 충분히 갖추고 있다. 서울의 동부지역에서 여름철 고농도 오존이 자주 관측되는 이유는 인천, 부평과 서울 서부지역에서 배출되는 1차오염물질과 고농도 오존, 서울의 전지역에서 배출되는 NO₂ 및 VOC, 난지도 등에서 배출되는 VOC 등이 약한 풍속으로 서서히 이동하면서 광화학 반응을 통해 오존이 생성되고, 주풍향인 서풍에 의해 풍하쪽인 한강의 동부지역에 착지하기 때문인 것으로 사료된다. 이와 같은 결론은 서울, 수도권의 오염원들이 서울을 중심으로 서쪽에 위치하고 있어 광화학 반응물질의 이동에 의한 오존생성 가능성이 있다는 연구결과에서도 시사한 바

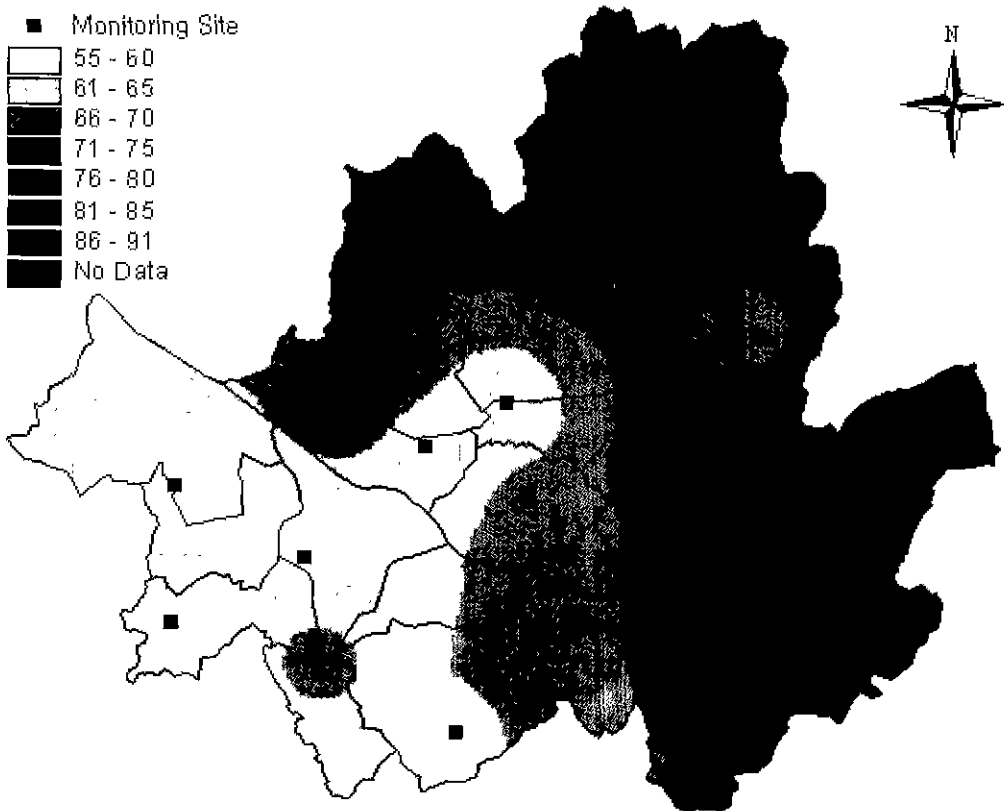


Fig. 2. Spatial interpolation map for the 3-year ('95~'97) average of the annual 4th-highest daily maximum 8-hour ozone concentration in Seoul.

있다(김영성, 1997; 이종범과 방소영, 1997; 정용승과 정재섭, 1991). 서울 북동부지역에 위치한 쌍문동 주변지역은 오존농도 90 ppb 이상으로 매우 높게 관측되었다. 북동부지역은 여러 산들이 둘러싸여 공기의 흐름을 방해하고, 서쪽으로 부터 이동된 1차오염물질과 오존 전조물질의 축적이 상당량 존재하여 고농도 오존을 발생시킨 것으로 사료된다. 서울 남서부지역인 오류동과 구로동 일대는 공업지역임에도 불구하고 타지역에 비해 오존농도가 낮은 것으로 분석되는 바, 이 지역이 풍하지역 고농도 오존 생성의 주요 오염원일 가능성이 높다. 또한, 남서부지역의 화곡동과 문래동 일대, 서울의 중심지인 광화문 주변지역은 오존농도 55~60 ppb로 서울지역에서 가장 낮은 오존농도 분포지역으로 관측되었다.

5. 결 론

오존에 관한 대기 환경기준과 오존농도 산정법의 검토를 통하여 우리나라 오존 오염의 실태를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

첫째, 십수년간 축적된 환경부의 대기오염 측정망 자료는 자료확보율이 점점 증가하는 추세이며, 측정소도 매년 증가하고 있다. 그러나, 지금까지 대기오염측정망자료가 단지 행정통계자료 정도로만 인식되어 활용이 미비했을 뿐 아니라, 국민의 보건과 재산상의 피해에 능동적으로 대처하며 환경정책 수립을 위한 기본자료를 제공하는데도 미흡했었다. 또한, 측정망 자료의 신뢰성을 점검하는 체계적 절차가 조속히 마련되어 충분히 점검을 거친 후 공개되어야 할 것이다. 상당한 경비를 들여 장시간 전국적으로 확보된 환경정보는 활용되어야 하고, 이 자료는 국민의 건강과 대기환경 보호를 위해 심층적으로 분석되어 합리적 정책개발에 응용되어야 할 것이다.

둘째, 서울 북동부지역과 동부지역, 춘천지역 및 경남 진해 등에서 고농도 오존의 축적이 장시간 관측된 것으로 분석되는 바, 이들 고농도 오존 발생지역에 대한 저감대책이 마련되어야 할 것이다.

셋째, 우리나라의 8시간 오존농도 산정법과 EPA의 산정방법을 토대로 오존기준치 초과 건수를 비교한 결과, EPA의 산정법에 의한 초과 건수가 우리나라의 산정법 보다 월등히 높았다. 따라서, 추후 국

내 각 지자체에 대해 대기오염규제지역이 설정될 때, 현재와 같은 단순 산술평균에 입각한 오존농도의 대표치는 중요성이 반감될 수 있다. 그러므로, 평균 오존농도에 대한 새로운 농도 계산방식을 검토하여야 하며, 우리나라의 오존에 대한 기준치도 행정적 목표치에서 벗어나 국민의 건강에 근거를 둔 실질적 기준으로 개정되어야 한다. 또한, 오존이 고농도하에 단기 노출되었을 때보다 중간농도(80 ppb 정도)로 장시간 축적되었을 때, 인체 및 동식물에 더 큰 영향을 준다는 보고가 급증하느니 만큼, 현행 단기기준을 장기 축적기준으로 개정할 당위성도 있다.

넷째, 우리나라 대기 환경기준 항목의 평균농도 계산법은 구체화되어 공포되어야 하며, 실시간 분석을 위한 분석프로그램의 개발이 시급하다.

참 고 문 헌

김영성 (1997) 1990~1995 서울·수도권지역의 광화학 오염현상, 한국대기보전학회지, 13(1), 41-49.
 이종범과 방소영 (1997) 1997년 6월 수도권지역의 오존 episode 사례분석, 한국대기보전학회 추계 학술대회 요지집, 동신대학교, Nov., 1997, 110-111.
 윤훈주와 김동술 (1997) GIS를 이용한 강하분진 중 금속 원소의 공간분포분석, 한국대기보전학회지, 13(6), 463-474.
 정용승과 정재섭 (1991) 서울 수도권지역의 광화학 오존에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 7(3), 169-179
 조수현 (1998) 대기 중 오존과 미세먼지에 의한 건강 영향 평가, 서울대학교 환경의학연구소
 환경부 (1998) 환경백서, 294-295.
 AEA Technology (1997) <http://www.aeat.co.uk/netcen/airqual/networks/exco3.html>.
 Bower, J.S., K.J. Stevenson, G.F.J. Broughton, J.E. Lampert, B.P. Sweeney, and J. Wilken (1994) Assessing Recent surface ozone concentration in the U.K., Atmos. Env., 28(1), 115-128.
 Chico, T S Mitsutomi, J.C. Lester, J.C. Cassmassi, H Hogo, and C.S. Liu (1991) Model performance for three ozone meteorological episodes in the south coast air basin. AWMA. For presentation at the 83th Annual Meeting & Exhibition Vancouver, British Columbia, June 16-21
 USEPA (1997) Federal Register, 40 CFR Part 50, 60(138).
 USEPA (1998a) <http://www.epa.gov/oar/oaqps/monitoring>.

- html#criteria.
- USEPA (1998b) <http://www.epa.gov/oar/oaqps/greenbk/ozone1hr/may98/final.html>.
- Fuentes, J.D, and T.F. Dann (1993) Ground-level ozone in Montreal, Canada, *Atmos. Env.*, 27B(1), 93-103.
- Godish, T. (1991) *Air Quality*, Lewis Publishers Inc., Michigan.
- Koenig, J.Q. (1995) Effects of ozone on respiratory responses in subjects with asthma, *Environmental Health Perspectives*, 103, 104-105.
- Leforn, A.S. (1997) Science, uncertainty, and EPA's new ozone standards, *ES&T*, 3(16), 280-284.
- Lippman, M. (1989) Ozone health effects and emerging issues in relation to standards setting, *Atmospheric Ozone Research and its Policy Implications*, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 21-33 pp.
- Lippmann, M. (1991) Health effects of tropospheric ozone, *ES&T*, 25(12), 1954-1962
- Ludwig, F.L., J.Y. Jiang, and T. Chen (1995) Classification of ozone and weather patterns associated with high ozone concentrations in the San Francisco and Monterey Bay Areas. *Atmos. Env.*, 29(21), 2915-2928.
- Lyons, W.A., J.L. Eastman, R.A. Pielke, C.J. Treback, P.A. Moon, and N.R. Lincoln (1991) The meteorological of ozone episodes in the lower lake Michigan Air Quality Region, AWMA. For presentation at the 83th Annual Meeting & Exhibition Vancouver, British Columbia, June 16-21.
- Nichols, M. (1997) Clearing the air: EPA's proposals on ozone and particulate matter, *Environmental Manager*, Feb., 19-21
- Poulida, O., R.G. Wardell, and J.G. Watkins (1991) Trace gas concentrations and meteorology in rural Virginia: 1. Ozone and carbon monoxide, *Journal of Geophysical Research*, 96(D12), 22461-22475.
- Showman, R.E. (1991) A comparison of ozone injury to vegetation during moist and drought years, *J. AWMA*, 41(1), 63-64.
- Spektor, D.M. and M. Lippmann (1990) Health effects of ambient ozone on healthy children at a summer camp, AWMA for presentation at the 83rd Annual Meeting & Exhibition, Pittsburgh, Pennsylvania, June 24-29.
- Sun, M. (1988) Tighter ozone standard urges by scientists, *Science*, 240, 1724-1725.
- Tilton, B.E. (1989) Health effects of tropospheric ozone. *ES&T*, 23(3), 257-263.
- Tomlinson, R.F. (1972) *Geographical data handling*, Ottawa, International Geographical Data Sensing and Processing.
- Vukovich, F.M. (1995) Regional-scale boundary layer ozone variations in the Eastern United States and their association with meteorological variations. *Atmospheric Environment*, 29(17), 2259-2273.
- Wolff, G.T. (1996) The scientific basis for a new ozone standard, *Environmental Manager*, Sep., 27-32.