

PSI 지수를 이용한 제주시 대기질 평가

이 기 호 · 김 식 유* · 허 철 구

제주대학교 환경공학과, *제주도보건환경연구원

Air Quality Assessment of Cheju City by PSI

Ki-Ho Lee, Sik-Yu Kim* and Chul-Goo Hu

Dept. of Environmental Engineering, Cheju National University, Che-ju 690-756, Korea

**Institute of Health and Environment of Cheju-do, #313-40, Yeundong, Cheju 690-170, Korea*

This study is carried out to assess the air quality of Cheju city by the Pollutant Standard Index (PSI) revised on 1998 by U.S. EPA, on the basis of the measurement data from the air quality monitoring network station from 1996 to 1998.

By the hourly PSI reports in Cheju city, the air quality of this city is mostly classified into "Good" and "Moderate" categories. As a critical pollutant, the occurrence frequency is 58.2 % for PM10, 36.85 % for O₃, 3.59 % for SO₂ and the remainder for CO. NO₂ is never reported as a critical pollutant in this study. When the air quality in Cheju city is, sometimes, classified into "Very unhealthy" and "Hazardous" categories, only PM10 is reported as a critical pollutant. The air quality of this city is mostly classified into "Good" category, although ozone is frequently reported as a critical pollutant, especially in spring season. The peak of PSI value is appeared at 11:00 AM during the day and on May during the year. Generally, it seems that this PSI method is well applied to assess the air quality of Cheju city with the background air quality level.

Key words : Pollutant Standard Index, air quality, critical pollutant, Cheju city

서 론

우리의 일상 생활과 밀접한 대기의 질을 좌우하는 요인은 워낙 복잡하기 때문에 대기오염물질을 측정, 분석하는 단편적이고 고전적인 방식으로는 종합적으로 평가하는 데 한계가 있다. 그렇다고 모든 대기오염물질을 측정하여 대기질을 평가한다는 것도 사실상 불가능하다.

우리 나라를 포함한 대부분의 국가에서는 기술적, 경제적으로 관리와 측정이 가능한 주요 대기오염물질을 대기환경기준 설정항목으로 규정하여 이들 항목에 대한 대기 중 농도를 측정하여 일반인에게 알리고 있

다. 그렇지만 이런 대기오염 측정자료는 특정 오염물질의 대기 중 농도를 나타내는 수치로만 표현되기 때문에 전문가가 아닌 일반인이나 정책입안자들은 오염 정도가 어느 정도인지를 알기가 어렵다. 따라서 대부분의 시민들은 대기오염이 나쁘다는 사실만 느낄 뿐 실제로 개개인에게 구체적으로 얼마나 해로운 것인가 하는 문제는 제대로 인식하지 못하고 있다. 게다가 대기오염의 원인 물질은 그 종류가 워낙 많기 때문에 개별 오염물질의 대기 중 농도만으로는 대기질을 종합적으로 평가하기 아주 곤란하다. 따라서 일반인들도 현재의 대기오염 상태를 보다 쉽게 인식할 수 있을 뿐 아니라 대기질을 종합적으로 평가할 수 있는

대기환경과 관련된 지수를 산정할 필요성이 대두되었다 (日本化學會, 1974; 이, 1995).

환경기준이나 환경지수는 환경목표를 수립하여 시행하고 그 효과를 평가하는 환경 정책적인 면에서 매우 유용한 도구로 활용되고 있다. 그렇지만 환경기준은 새로운 환경인자에 대한 추가 기준설정이 어려울 뿐 아니라 환경기준에 대한 객관적 판단과 환경상황이 개선될 경우에 그 역할을 정립하기 쉽지 않다는 점등의 한계를 지닌다. 따라서 이런 한계점을 보완 또는 극복해야만 하는 당위성이 제기됨에 따라 캐나다, 미국 등을 중심으로 환경분야는 물론이고 사회, 경제분야 등 전 분야에 걸친 평가방법에 관한 다양한 연구가 진행된 바 있다(EPA, 1978; Inhaber, 1974). 특히 대기환경 부문에서 실용성이 있는 지수를 개발하여 대기환경의 상태를 파악하는데 활용하고 이를 통해 환경정책의 기본방향과 정책목표를 수립하고 있는 실정이다. 특히 미국에서는 1976년부터 전국적으로 통일된 대기질 지수를 개발하여 널리 사용하고 있을 뿐 아니라 지속적으로 수정 보완하고 있다.

이런 관점에서 보면, 대기환경기준의 달성여부를 대기질 평가의 유일한 척도로서 활용하고 있는 우리나라의 경우에는 대기질에 관한 종합적인 평가를 제대로 못하고 있다고 생각할 수 있다. 따라서 우리나라에서도 환경지수의 필요성이 인식되어 미국 환경처에서 개발된 대기질 지수 (PSI)를 수정한 대기환경지수(AEI) 산정법을 개발한 바 있으나, 단지 미국에서 적용되는 지수값을 우리가 인식하기 편리하도록 조정한 정도이며, 지역적인 환경 특성이 전혀 고려되지 않은 획일적인 평가기준을 적용함으로써 지역의 실제 대기질을 정량적으로 평가하는 데는 아직도 많은 문제점을 내포하고 있을 뿐 아니라 대기질 지수에 대한 인식 부족으로 실제로는 거의 활용되지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 미국에서 최근에 수정 발표된 미국의 PSI 지수를 이용하여 인위적인 대기오염 물질의 배출량이 아주 적어서 청정지역으로 알려진 제주도 지역 중에서도 인구가 가장 밀집된 도시인 제주시 지역의 대기질을 평가하고자 했다. 이를 위해서 PSI 지수의 출현 빈도 및 변동 특성을 시간대별로 파악함과 동시에 기존의 대기환경지수 방식과 비교

평가하므로서 수정 PSI 지수의 청정지역에 대한 적용 타당성을 검토하고자 한다.

대기질 지수

대기질 지수는 개별 환경지수로서 지수 설정에 필요한 자료는 각 대상지역에 대한 현지조사와 통계연보를 통하여 수집하고 수집된 자료는 계량화, 척도화 등을 거쳐서 지수화를 하는데, 여기서는 이미 미국에서 개발된 바 있는 지수와 우리 나라에서의 적용을 목적으로 개량한 지수에 대해 살펴보면 다음과 같다.

PSI(Pollutant Standard Index)

미국 EPA와 CEQ (President's Council on Environmental Quality) 에서 70년대 중반까지 미국과 캐나다에서 대기질에 관한 지수를 사용하고 있는 55개 도시지역을 대상으로 조사한 바에 의하면, 각기 다른 주의사항 (cautionary message)을 지닌 지수까지 포함하여 14개의 각기 다른 지수들을 사용하고 있는 것으로 나타났다. 이처럼 각기 다른 지수를 사용함으로써 일반 대중에게 전달되는 대기질에 관한 정보가 혼란스러워 1976년에 미국 EPA에서는 PSI (Pollutant Standard Index) 라고 불리는 전국적으로 통일된 대기질 지수 (uniform air quality index)를 개발하여 주 정부와 지방 정부에서 사용토록 했으며, 캐나다, 대만 등에서도 이용하고 있다.

이 지수의 장점은 다음과 같다. 첫째, 대기질에 관한 전국적으로 통일된 정보를 제공함으로써 일반대중에게 분명하면서도 일관된 안내를 할 수 있으며, 둘째 대기질과 공중보건에 관련된 과학적 근거를 지닌 미국의 국가대기환경기준(NAAQS) 및 심각한 危害농도(SHL)와도 조화를 이루며, 셋째 일반 대중이 쉽고 분명하게 이해할 수 있고, 넷째, NAAQS의 변화에 적절히 대처할 수 있는 기초를 제공하며, 다섯째 대기질에 관한 진보된 정보를 제공하기 위해서 예측도 가능하다.

미국의 EPA에서는 인구 350,000명 이상인 대도시 지역에서는 전국적으로 통일된 PSI 지수를 산정하여

매일 보도하고 있다. 일부에서는 AQI라고도 불리는 PSI는 O₃, 부유분진 (PM), CO, SO₂와 NO₂에 대한 부지수 (sub-index) 를 갖고 있으며, 대기 중 오염물질의 농도를 0에서 500까지 점수 척도로 나타낸 지수 값과 관련시키고 있다. 이 지수는 청정공기에서부터 대중에게 간박하고 실제적인 위험을 줄 수 있는 오염된 수준에 이르기까지 아주 폭넓은 대기질의 범위를 표현하고 있다. 이 지수는 각 오염물질에 대한 1차 NAAQS의 수치적인 수준에 대해서 100이란 지수값을 정의하고, SHL에 대해서는 500의 지수값을 정의함으로써 오염물질들을 표준화하고 있다. 그리고 200, 300 및 400으로 설정된 중간 지수값은 미국연방 에피소드 기준의 alert, warning 그리고 emergency level에 기초하고 있다. 100이하의 지수값으로서 50이란 중간값은 연평균기준(annual standards)이 설정되어 있는 항목(PM10과 SO₂에 대해서)에 대해서는 연평균 기준의 수준으로 그리고 CO와 O₃에 대해서는 100의 지수값을 정의하는데 사용된 단기기준(short-term standard)의 1/2 값에 해당하는 농도로서 정의하고 있다.

1997년 7월에 기존 NAAQS에 규정된 대기오염물질 중 건강에의 악영향과 관련된 과학적인 증거들에 대한 적절한 검토를 기초로 하여 O₃과 부유분진에 관한 1차 NAAQS의 개정이 이루어졌다. 특히 오존의 경우 그 동안 적용해온 1-시간 평균 농도를 8-시간

평균 농도로 대체하였고, PM2.5로서 측정되는 미세 먼지에 대한 24-시간 및 연평균 기준을 새롭게 NAAQS에 추가했다. 이처럼 NAAQS가 개정됨에 따라서 NAAQS와 지수값 사이의 관계를 유지하기 위해서 기존 PSI 체계에 대한 변화를 줄 수밖에 없었다(EPA, 1998).

개정 PSI

1998년에 개정된 PSI(개정 PSI)는 O₃, 부유분진, CO, SO₂ 및 NO₂로써 구성하고 지수값은 기존의 체계와 마찬가지로 0~500의 범위인데 이 지수값은 매일의 대기질과 공중 보건사이의 관련성을 설명하는데 쓰이는 평가문(descriptor)으로서 설정된 5개의 등급으로서 구분된다. 이들 대기오염물질에의 노출 및 그와 관련된 건강에의 영향에 대한 현재의 지식을 보다 잘 반영하기 위해서 Table 1에 나타낸 바와 같이 PSI 지수값(index value), 평가문(descriptors) 그리고 관련된 색깔(color)들을 개정하여 제시하였다.

개정 PSI의 구성에 있어서 변화는 NAAQS에 새롭게 설정된 8-시간 평균오존농도(8-hour O₃)를 PSI 체계에 반영하기 위한 목적 이외에도 기존의 PSI 체계에 대한 전반적인 수정을 시도했다. 특히 PSI 체계에 대한 기본적인 변화는 "unhealthful" 등급 (PSI 값 : 101~200)을 "unhealthy for sensitive group" 등

Table 1. Proposed Category Index Values, Descriptors, and Colors

Index Values	Descriptor	Color	Purpose
0~50	Good	Green	Convey positive message about air quality.
51~100	Moderate	Yellow	Convey message that daily air quality is acceptable from public health perspective, but every day in this range could result in potential for chronic health effects; and for O ₃ convey a limited health notice for extremely sensitive individuals.
101~150	Unhealthy for Sensitive Groups	Orange	Health message for members of sensitive groups.
151~200	Unhealthy	Red	Health advisory of more serious effects for sensitive groups and notice of possible effects for general population when appropriate.
201~300	Very Unhealthy	Purple	Health alert of more serious effects for sensitive group and the general population.
301~500	Hazardous	Maroon	Health warning of emergency conditions.

Table 2. Breakpoints for O₃, PM_{2.5}, CO, and SO₂ sub-indices

PSI value	O ₃		PM		CO	SO ₂
	8-hr (ppm)	1-hr (ppm)	PM _{2.5} , 24-hr (μg/m ³)	PM ₁₀ , 24-hr (μg/m ³)	8-hr (ppm)	24-hr (ppm)
50	0.07	-	15	50	4	0.03
100	0.08	0.12	65	150	9	0.14
150	0.10	0.16	100	250	12	0.22
200	0.12	0.20	150	350	15	0.30
300	0.40(1-hr)	0.40	250	420	30	0.60
400	0.50(1-hr)	0.50	350	500	40	0.80
500	0.60(1-hr)	0.60	500	600	50	1.00

* If a different SHL for PM_{2.5} is promulgated, these number will change accordingly.

급 및 "generally unhealthy" 등급으로 세분하였다. 여기서 "unhealthy for sensitive group" 등급에 대한 PSI 계급값은 101~150으로 설정하였는데, 이는 건강한 일반 대중에게는 별다른 주의보를 발령하지 않으면서도 대기오염에 민감한 사람들에 대해서는 적절한 주의를 환기시키려는 목적이었다. 그리고 또 다른 변화는 PSI 계급값으로 201~300 등급의 평가문을 "very unhealthy"에서 "very unhealthy"로 수정하였으며, 나머지 등급에서는 변화 없이 그대로 유지했다.

이상에서 언급한 개정 PSI에 대해서 제안된 O₃, PM, CO 및 SO₂의 부지수 값에 대한 기준값 (breakpoints)을 Table 2에 요약했으며 이러한 기준값을 잘 잘 반영하기 위해서 적용된 구체적인 수치적 규칙은 관련 web site에 잘 정리되어 있다.

개정된 PSI의 특징은 다음과 같다. O₃에 대한 1차 NAAQS가 개정되면서 1시간 평균농도기준은 8시간 평균농도기준인 0.08ppm으로 개정되었다. 따라서 기준값 수준이하 즉 PSI 50이하에 해당되는 기준값으로 8시간 평균 농도값으로서 0.07 ppm을 적용토록 했다. 매일의 O₃ 농도가 아주 높은 1-hour 농도의 피크를 나타내는 대기질을 지닌 지역인 경우에는 1-hour sub-index를 적용하는 것이 새로이 제시된 8-hour sub-index를 사용하는 것보다 건강보호에 더욱 유익할 수도 있다는 점을 인정하고 있다. 따라서 건강보호가 보다 더 가능한 부지수값을 보도 (reporting)할 수 있도록 하기 위해서 PSI 100과 그 이상에서 1-hour 부지수값을 존속시키고 있으며, 8-hour와 1-hour에 대한 O₃ 부지수값에서는 더 높은

값을 보인 PSI값을 채택하도록 하였다. 1-hour 평균인 0.16ppm의 기준점을 PSI값 150에 대응토록 1-hour 부지수를 추가했다. 이 값은 PSI값 100과 200에서의 기준값의 중간값을 사용할 것이다. PSI의 기본적 체계를 유지하기 위해서 지수값 100에 대응하는 24-hour PM_{2.5} NAAQS는 65μg/m³이고 PSI 지수값 50에는 연간평균 NAAQS인 15μg/m³을 대응시켰다. 그리고 500에는 SHL을 대응시켰다. 그러나 이 SHL은 1999년 증반기에 수정될 예정이므로 PSI체제도 다시 개정될 것으로 예상된다. PSI 100과 500사이에서의 중간 기준값에 대해서는 PM_{2.5}농도는 지수값의 증가와 PM_{2.5}의 농도 증가 사이에 직선적인 상관관계로서 반영했다.

AEI (Air Environment Index)

미국에서 초기에 개발된 PSI 지수산정 방법을 준용하여 이를 국내에 적용하기 위해서 국립환경연구원 에서 연구·개발한 것이 AEI이다. AEI는 PSI에 적용되었던 SO₂, CO, NO₂, TSP, O₃, TSP×SO₂ 환경인자를 사용하고, 0~500 범위를 우리의 정서에 가까운 0~100으로 수정하였던 것이다. 환경기준치는 우리 나라에서 사용중인 장·단기 기준치 및 미국 EPA기준치를 이용하여 5개 범주로 구분하고 PSI와 같은 방법으로 계산된 각 오염지수에서 가장 높은 지수를 AEI로 선택한다. 또한 AEI값은 각 한계치는 20을 장기기준, 40을 단기기준으로 하여 60, 80, 90, 100은 EPA의 인체 건강과 관련한 주의, 경고, 위급, 심

각한 위해 농도 기준으로 했다. 따라서 0~20은 "양호", 20~40은 "보통", 40~60은 "나쁨", 60~80은 "매우 나쁨" 그리고 80~100은 "위해"로 나타내고 있다. 초기 PSI와 AEI의 기준, 계산방법, 각 오염물질별 부지수값에 대한 기준값 및 지수에 관한 설명 등은 여러 문헌에 이미 소개되어 있다(국립환경연구원, 1990; 이, 1995; 허 등, 1997; 김, 1999).

AI(Air Index)

AI는 ORAQI를 변형한 것으로 SO₂, CO, NO₂, TSP(PM₁₀), O₃ 의 5개 인자를 사용하여 환경기준치의 0.5배 되는 것이 5개중 2개, 기준치의 1배가 되는 것이 3개일 때를 60으로 하고, 5개 인자가 기준치의 1배가 될 때를 80으로 한다. AI의 기준치는 우리나라 단기기준치, 즉 SO₂ : 0.14 ppm(24시간), NO₂ : 0.15 ppm(1시간), TSP : 300 μg/m³(24시간), PM10 : 150 μg/m³(24시간), CO : 9 ppm(8시간), O₃ : 0.1 ppm(1시간)을 적용하여 지수값을 산출하고, 이 지수값을 5등급, 즉 0~15(I 등급), 15~30(II 등급), 30~60(III 등급), 60~80(IV 등급), 80 이상(V 등급)으로 구분하여 좋음, 보통, 나쁨, 매우 나쁨, 危害로 나타낸다. 그러나 AI는 대기오염 개별 인자에 대하여 가중치를 두지 않고, 예측이 어렵다는 단점 때문에 그 활용도가 적다. 이 지수에 관한 구체적인 설명 또한 여러 문헌에 이미 보고되어 있다(국립환경연구원, 1990; 이, 1995; 허 등, 1997; 김, 1999).

연구방법

대기질 측정

대기질 지수를 산정하기 위해서는 대기질의 연속측정이 가능한 지점에서의 측정자료를 이용해야 신뢰도가 높은 평가자료를 얻을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 제주시의 대기환경지수를 산정하기 위해 환경부에서 운영하고 있는 제주시 이도동의 대기질자동측정망의 측정자료를 이용하였다. 제주시 자동측정망 설치지점은 Fig. 1에 나타냈으며, 지리적으로 제주도 북쪽의 해발 70m 지점에 위치하며 주변에 차량왕래가

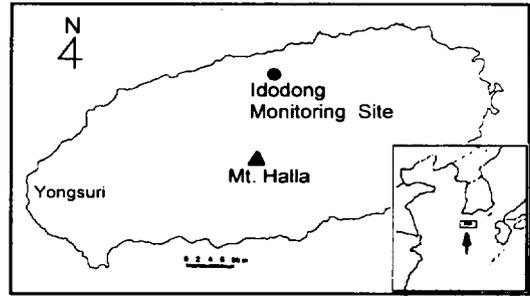


Fig. 1. The location of monitoring network for measuring the air quality of Cheju city.

아주 빈번한 주거·상업지역에 위치하고 있다. 이 대기질 자동측정망에서는 PM₁₀, O₃, NO, NO₂, CO, SO₂에 관한 매시간 평균 농도를 측정하고 있다. 본 연구에서는 1996년부터 1998년까지 3년간의 자료를 수집하여 NO를 제외한 나머지 항목들의 자료를 처리하였다. 총 5개의 고려 대상 항목 중 4개 이상의 항목에 대해 결측이 없이 동시 측정이 이루어진 경우에만 유효자료수로 선정하였다. 연도별로 유효 자료수를 보면, 96년에는 8073회, 97년에는 7072회 그리고 98년에는 7905회로서 매년 총 시간수의 92%, 80% 및 90% 이상의 유효한 자료를 선정할 수 있었다.

그리고 본 연구에서 O₃에 대한 대기질 측정자료를 이용하여 8시간 평균오존 농도를 계산하였는데, 이때 8시간 평균 O₃ 농도는 미국 EPA에서 적용하는 산출방식을 따라서 매일 24회의 8시간 평균농도를 산출했다.

지수산정 방법

PSI 산정 방법

PSI 산정 방법은 다음의 식을 이용했다.

$$I_p = \frac{I_{Hi} - I_{Lo}}{BP_{Hi} - BP_{Lo}} (C_p - BP_{Lo}) + I_{Lo} \quad (1)$$

여기서, I_p : 오염물질 P에 대한 지수값

C_p : 오염물질 P의 농도

BP_{Hi} : C_p 이상의 기준값

BP_{Lo} : C_p 이하의 기준값

I_{Hi} : BP_{Hi} 에 대응하는 PSI 값

I_{Lo} : BP_{Lo} 에 대응하는 PSI 값

PSI 값 = max [I_p]

를 그대로 인용하였다.

결과 및 고찰

즉 PSI 산정방법은 매 시간별 오염인자 및 농도에 따라서 식(1)을 이용하여 앞에서 언급한 부유분진(PM_{10}), O_3 , NO_2 , CO , SO_2 의 5개 항목에 대한 지수값을 각각 계산한 후, 그 계산된 부지수값 중에서 가장 높은 값을 'PSI'로 선정하게 되고 PSI로 선정된 지수값을 나타낸 오염물질을 주요오염물질(critical pollutant)로 채택하게 된다.

그리고 각 오염물질별로 적용된 부지수값에 대한 기준값은 미국 EPA에서 제안한 규칙을 그대로 사용하였다.

AEI 및 AI 산정 방법

AEI 및 AI 지수에 관련한 자료는 본 연구와 동일한 지역에 대해서 1996년 4월부터 1997년 3월까지 1년간의 자료를 이용하여 산출한 허 등(1997)의 결과

대기질 현황

환경 대기중의 오염물질농도는 대기오염 배출원에서의 배출량 뿐 만 아니라 기상조건 등에 따라 많은 차이를 나타내는데, 대기질의 경시변화 특성을 파악하기 위해 연속측정이 이루어지고 있는 환경부 대기오염자동측정망 중 제주도 이도동에서의 측정자료를 이용하여 월별 변화경향과 시간에 따른 변화특성을 비교·분석하였다.

본 연구에서 사용한 1996년부터 1998년까지 제주에서 관측된 대기오염도 자료를 정리하여 Table 3에 나타냈다. 관측지점이 상가지역 중심에 위치하고 있음에도 불구하고 전반적으로 양호한 대기질을 보이고 있음을 알 수 있다. 계절별로 보면, 전반적으로 계절별 변동이 크지 않으나, 부유분진과 오존은 봄철에 비교적 높게

Table 3. The ambient concentrations of five major air pollutants based on 1-hour average concentration data

Season	Year	PM10 ($\mu g/m^3$)	SO ₂ (ppb)	NO ₂ (ppb)	O ₃ (ppb)	CO (ppm)
	96	38.9±30.82	8.4±5.97	16.6±10.40	30.9±15.96	0.5±0.42
	97	33.2±23.32	5.0±3.27	10.9± 7.57	28.7±12.51	0.7±1.18
	98	35.6±30.10	5.5±3.91	15.4±11.61	33.0±15.37	0.8±0.43
	Mean	36.6±27.07	6.7±4.62	13.8± 8.99	29.8±14.24	0.6±0.80
Spring	96	49.1±39.74	7.0±4.72	19.5±11.37	40.5±22.54	0.4±0.31
	97	39.4±26.67	5.3±4.29	7.8± 5.88	30.1±13.04	0.5±0.45
	98	39.6±41.97	5.2±3.36	17.1±11.30	39.8±15.89	0.6±0.34
	Mean	42.7±25.91	5.8±4.12	15.0± 9.52	36.6±17.16	0.5±0.37
Summer	96	36.5±25.91	11.8±6.96	12.1±8.65	24.2±15.38	0.7±0.46
	97	36.0±26.99	6.0±2.64	11.1±6.67	24.9±13.93	0.7±0.41
	98	28.6±23.12	5.4±5.18	12.0±7.62	29.7±15.50	6.8±3.66
	Mean	33.7±25.34	7.7±4.93	11.7±7.65	26.3±14.94	0.7±0.41
Fall	96	33.1±22.46	7.5±5.6	18.3±11.18	29.9±13.94	0.2±0.15
	97	26.1±16.71	3.4±2.11	14.8±9.88	31.6±13.24	1.0±3.35
	98	40.9±29.94	4.5±2.88	15.4±16.06	30.6±16.78	0.8±0.39
	Mean	33.5±23.03	5.2±3.53	16.2±12.37	30.7±14.66	0.7±1.30
Winter	96	37.0±35.16	7.4±6.60	16.7±10.42	28.8±11.97	0.8±0.76
	97	31.2±22.92	5.2±4.01	9.9± 7.87	28.2± 9.84	0.6±0.53
	98	33.1±25.36	6.8±4.21	16.6±11.46	31.8±13.30	1.1±0.64
	Mean	33.8±27.81	6.5±4.94	14.4± 9.91	29.6±11.70	0.8±0.64

나타나고, 표준편차도 또한 크게 나타남을 볼 수 있다.

제주시 이도동 측정소의 자료를 이용하여 대기질의 월별 변화경향을 Fig. 2에 나타냈다. 전체적으로 인위적인 오염원의 영향을 직접적으로 받고 있는 제주시 지역의 대기오염물질의 농도는 월별 변동폭이 다소 높게 나타났다. 그러나 국내의 다른 대도시 지역이나 공업지역(정 등, 1994; 신 등, 1992) 등과 비교하면 농도가 낮을 뿐만 아니라 월별 변동폭도 훨씬 적은 편이다. 그리고 봄철에 오존과 부유분진 농도가 뚜렷이 증가되는 현상을 볼 수 있다. 부유분진 농도가 증가하는 것은 매년 봄철에 주로 발생하는 황사현상의 영향으로 생각되며, 오존농도의 증가는 아직 명백한 결론이 내려지진 않았지만 여러 학자들에 의해 제기되고 있는 봄철의 성층권 하강기류에 의한 오존의 유입에 기인한 것으로 추정되지만(Angle and Sandhu, 1989; Wakamatsu et al., 1989; Sunwoo et al., 1994), 이에 대해서는 앞으로 대규모 대기순환관계 등에 대해 심도 있게 분석할 필요가 있다고 생각된다.

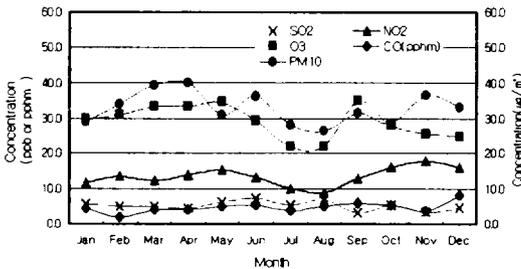


Fig. 2. Monthly variation of air quality in Cheju city.

Fig. 3에는 대기오염물질 농도의 일 중 시간별 변화 경향을 나타냈다. 제주시 지역의 대기오염물질 농도는 출퇴근 시간 등 인간의 활동 시간대에 직접적인 반응을 보이는 시간적 변동특성을 나타냈다. 이런 변동 특성을 화력발전소와 난방연료 등에서 많이 배출되는 황산화물(SO₂)의 농도에 비해 자동차에서 주로 배출되는 일산화탄소(CO)와 질소산화물(NO_x) 등의 농도 변화에서 이러한 현상이 돋보이는 것으로 보아 제주시 지역의 대기오염 배출특성을 잘 반영하고 있는 것으로 판단된다. 특히 NO₂는 출근시간대에 증가한 후 감소하는 추세를 보이고, O₃는 출근시간대부터 점차

증가하는 추세를 보임을 볼 때 제주시 지역에서는 광화학 반응에 의한 오존의 생성과 소멸현상의 영향도 어느 정도 존재하는 것으로 생각된다(허 등, 1997).

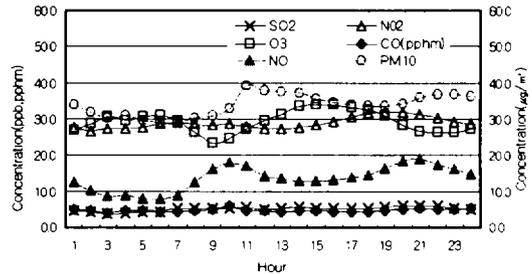


Fig. 3. Daily variation of air quality in Cheju city.

PSI 지수에 의한 대기질 평가

PSI 지수값의 분포

1998년에 개정된 PSI를 이용하여 제주시 대기질에 관한 매 시간별 PSI 값을 산출한 결과를 연도별, 계절별로 정리하여 Table 4에 나타내었다.

1996년부터 1998년 동안의 PSI 분포의 변화를 보면 대기질이 "good" 수준인 PSI 0~50 계급에서의 출현 빈도가 높아지면서 전반적으로 "good"과 "moderate"인 대기 상태를 보임을 알 수 있다. 그러나 "unhealthy for sensitive group" 상태의 출현 빈도도 96년에 74회, 97년에 26회, 98년에 41회 나타났으며 98년에는 "hazardous"한 상태가 8회 나타나기도 했다.

제주시의 대기질 자료가 교통량이 많은 상가지역 중심에서 관측되었음에도 불구하고 연도별로 계산된 PSI 값의 출현빈도를 볼 때, 제주시의 대기질은 대부분이 "good" 상태임을 알 수 있다. 그리고 PSI 값이 100이상인 대기질은 3년간 총유효시수 23,050회중 0.8%인 181회 출현하는 정도였다. 그리고 "very unhealthy" 상태인 대기질의 출현도 총 32회 나타났으며 이중 31회는 봄철에 나타났음을 볼 수 있다. 또한 지난 3년간 PSI값 300 이상인 "hazardous" 상태인 대기질도 총 8회 출현하였는데, 이는 모두 봄철에 나타났다. 이를 보면 봄철에 악화된 대기질 출현빈도가 타 계절에 비해 높음을 알 수 있다.

이런 결과는 제주시 지역의 대기질이 전반적으로

Table 4. Frequency of PSI value in Cheju city

Year or Season	Class of PSI value						Total
	0~50	51~100	101~150	151~200	201~300	301~500	
	I	II	III	IV	V	VI	
96	78.5 (6336)	20.3 (1637)	0.90 (74)	-	0.3 (26)	-	100 (8073)
97	82.2 (5812)	17.4 (1233)	0.40 (26)	-	-	-	100 (7072)
98	83.5 (6602)	15.8 (1248)	0.52 (41)	-	0.08 (6)	0.10 (8)	100 (7905)
Mean	81.3 (18750)	17.9 (4119)	0.61 (141)	-	0.14 (32)	0.03 (8)	100 (23050)
Spring	75.86 (4689)	22.81 (1410)	0.70 (43)	-	0.50 (31)	0.13 (8)	100 (6181)
Summer	84.77 (5121)	14.57 (880)	0.66 (40)	-	-	-	100 (6041)
Fall	84.37 (4684)	15.06 (835)	0.58 (32)	-	-	-	100 (5552)
Winter	80.67 (4256)	18.82 (993)	0.49 (26)	-	0.02 (1)	-	100 (5276)

() : Number of data

양호한 상태를 보이면서도 봄철의 황사가 유입되어 부유먼지의 농도가 증가하면서 일시적으로 대기질이 악화되는 상태 그리고 봄철 오존의 농도가 증가하는 상황을 비교적 잘 반영하고 있다고 생각된다.

주오염물질(critical pollutant)의 출현 분포

Table 5는 매 시간별로 추정된 주오염물질(critical pollutant)의 월별, 계절별, 연도별 출현분포를 나타낸 것이다. 3년 동안에 추정된 주오염물질로서는 PM10이 58.16%로 가장 많고, 다음으로 O₃이 36.85%이었으며, SO₂는 3.59% 그리고 나머지는 모두 CO로 출현함을 볼 수 있다. 본 연구대상기간중 주오염물질로서 NO₂가 선정된 경우는 없었다.

연도별로 보면, 주오염물질로서 PM10이 선정된 경우가 가장 많았으며, 연차적으로 오존의 주오염물질 출현빈도가 증가한 반면에 SO₂는 낮아지는 경향임을 볼 수 있었다.

계절별로 보면, 주오염물질의 출현빈도는 계절별로 볼 때 뚜렷한 차이점은 없으나 CO의 경우 겨울철에 출현빈도가 타 계절에 비해서 높게 나타남을 볼 수 있었다. 여름철의 경우 주오염물질로서 O₃의 출현빈도는 다소 둔화되면서 SO₂가 주오염물질로 출현하는

Table 5. Frequency of critical pollutants

Year	Critical pollutant (%)			
	PM10	SO ₂	O ₃	CO
'96	59.10	7.18	31.59	2.13
'97	62.51	1.71	35.31	0.47
'98	53.31	1.61	43.59	1.49
Mean	58.16	3.59	36.85	1.40
Jan.	50.09	3.97	45.54	0.40
Feb.	51.99	2.10	45.54	-
Mar.	58.01	1.10	40.71	0.19
Apr.	58.01	1.22	37.14	0.05
May.	49.22	2.17	48.47	0.14
Jun.	65.06	4.69	28.31	1.95
Jul.	62.24	7.11	30.31	0.34
Aug.	64.31	11.62	23.60	0.46
Sep.	50.75	1.41	46.76	1.07
Oct.	56.94	3.83	38.52	0.72
Nov.	70.40	1.42	26.83	1.35
Dec.	60.41	1.80	26.43	11.36
Spring	56.12	1.50	42.24	0.13
Summer	63.86	7.75	27.46	0.93
Fall	58.07	2.32	38.60	1.01
Winter	54.11	2.62	39.42	3.85

빈도가 크게 증가되고 있음을 알 수가 있다. 이는 앞의 Fig. 2에서 여름철에는 오존과 CO의 농도가 타

PSI 지수를 이용한 제주시 대기질 평가

계절에 비해 상대적으로 다소 떨어지고 SO₂는 증가하는 경향이 반영된 것으로 생각된다.

주요오염물질로서 PM10과 O₃의 출현 빈도를 합하여 보면 봄철에 98.36%, 여름철 91.32%, 가을철 96.67%, 겨울철 93.53%로서 봄철에 가장 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 Fig. 2에서처럼 PM10과 O₃의 농도가 증가하는 경향과 일치된 결과라고 생각된다.

주요오염물질 PSI 지수값 분포

Table 6은 PSI 지수계급별로 주요오염물질의 출현빈도를 나타낸 것이다. 모든 PSI 지수계급에서 PM10이 가장 큰 비중을 보이고, 특히 봄철을 제외한 타 계절에서는 "very unhealthy" 및 "hazardous"한 상태일 때는 모두 PM10이 주요오염물질로 나타남을 알 수 있다. 특히 "hazardous"의 대기 상태를 보인 것은 지

난 3년 동안에 98년 봄에 8회가 나타난 이외에는 출현되지 않았다.

SO₂가 주요오염물질로 나타날 때는 전부 "good" 또는 "moderate"인 대기질 상태였다. 오존은 "good" 상태일 때 46.03%, "moderate" 상태일 때 0.85%를 차지하였으며, "unhealthy" 상태일 때 4%정도, 그리고 "vey unhealthy" 상태일 때 24.24%정도를 차지함으로써 PM10 다음으로 큰 비중을 차지하는 오염물질임을 알 수 있다. 계절별로 보아도 이런 경향은 대체로 유지됨을 알 수 있다. 특히 봄철에 전체 PSI 지수계급별로 O₃의 비중이 증가됨을 볼 수 있다.

Fig. 4는 이상의 결과를 종합해서, 지난 3년간 제주시 이도동에서 대기오염물질의 농도를 매시간 연속 관측한 자료를 토대로 PSI 지수계급별 출현빈도와 각 계급별 주요오염물질의 점유비율을 표현한 것이다.

Table 6. Distribution of critical pollutant by description words (unit: %)

Descriptor		PM10	SO ₂	O ₃	CO
Total	Good	47.87	4.38	46.03	1.73
	Moderate	98.40	0.64	0.85	0.10
	Unhealthy	94.40	-	4.00	1.60
	Very Unhealthy	75.76	-	24.24	-
	Hazardous	100.00	-	-	-
Spring	Good	42.99	1.96	54.89	0.15
	Moderate	97.67	0.07	1.77	0.49
	Unhealthy	88.64	-	9.09	2.27
	Very Unhealthy	74.19	-	25.81	-
	Hazardous	100.00	-	-	-
Summer	Good	54.16	9.65	35.06	1.12
	Moderate	97.51	1.87	0.47	0.16
	Unhealthy	91.67	-	-	8.33
	Very Unhealthy	-	-	-	-
	Hazardous	-	-	-	-
Fall	Good	50.56	2.58	45.71	1.15
	Moderate	98.56	0.96	0.24	0.24
	Unhealthy	100.00	-	-	-
	Very Unhealthy	100.00	-	-	-
	Hazardous	-	-	-	-
Winter	Good	43.30	3.15	48.78	4.77
	Moderate	99.30	0.40	0.30	-
	Unhealthy	96.15	-	3.85	-
	Very Unhealthy	100.00	-	-	-
	Hazardous	-	-	-	-

제주시 대기질을 PSI 지수로서 평가할 때 제주시 대기질은 지난 3년간 대부분은 "good" 한 상태를 유지해 왔으며, 주요오염물질로는 대부분 PM10인 것을 알 수 있다. 그리고 주요오염물질로서 비록 오존이 나타나더라도 제주시 대기질은 대부분이 양호한 상태였던 것을 알 수 있다.

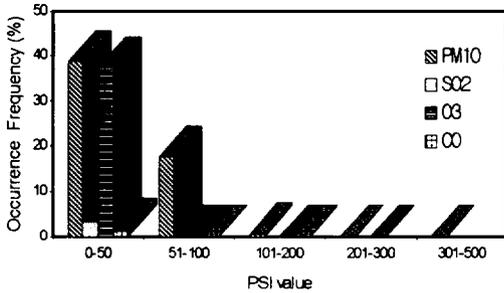


Fig. 4. Occurrence frequency of the critical pollutant according to the PSI value.

지수 산정방식에 따른 비교

본 연구에서는 개정된 PSI 지수 산정방식과 우리나라 실정을 고려해서 재구성한 AEI와 AI 지수 산정 방식을 비교해 보고자 동일한 기간동안 동안의 대기질 측정자료로서 각 지수별로 지수값을 산정하여 Fig. 5와 Fig. 6에 나타냈다. 여기에 동일 기간동안의 대기질 측정값도 참고로 제시하였다. Fig. 5와 Fig. 6은 시간대별 및 월별 PSI, AEI, AI 지수값의 변동 양상을 동일 기간의 대기오염물질의 농도 변동 양상과 함께 나타냈다.

Fig. 5에서 시간대별 변동 특성을 보면, AI 지수값의 시간대별 변화는 거의 없이 I 등급을 보이는데 비해서, AEI 지수값의 변동은 오존의 시간대별 변동 양상과 일치하면서 II등급 상태를 보이고, PSI의 경우 PM10의 시간대별 변동과 같은 양상을 보임을 알 수 있다. 그리고 PSI의 경우 10시에서 11시에 최대값을 보이는 반면에 AI와 AEI는 오후 3~4 시경에 최대값을 보임을 알 수 있다.

Fig. 6에서 월별 변동 특성을 보면, 모든 지수값의 월별 추세는 전반적으로 모두 비슷한 형태를 보임을 알 수 있다. AEI의 월별 변동은 역시 오존의 월별

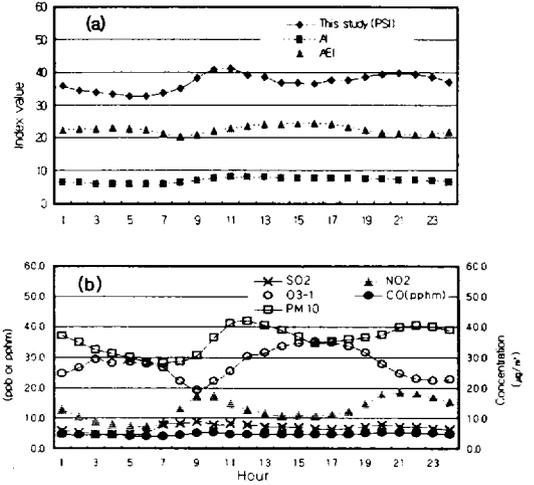


Fig. 5. Daily variation of various index values and air quality in Cheju city during 1996. 4~1997. 3, (a) index value, (b) air quality.

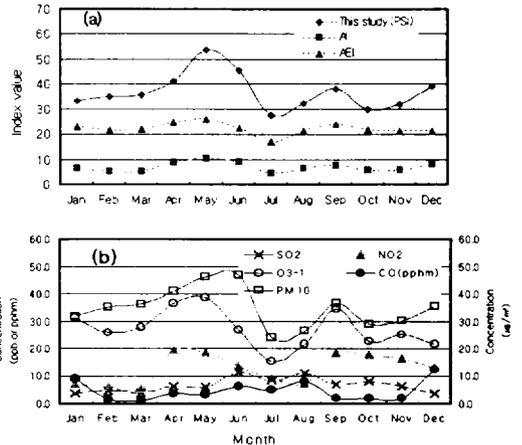


Fig. 6. Monthly variations of various index values and air quality in Cheju city during 1996. 4~1997. 3, (a) index value, (b) air quality.

변동과 닮은 경향이고, PSI의 변동 경향은 PM10의 경우와 아주 유사하다. AEI 지수로 볼 때 대부분 II 등급, AI 지수로는 모두 I 등급인 대기질로 평가되었다. 그리고 PSI 지수인 경우, 봄철에 PSI 지수가 크게 증가하는 경향을 보이는데, 이는 황사 등의 현상에 의해 PM10의 농도가 증가하면서 봄철에 대기질이 일시적으로 악화되는 경향이 비교적 빈번함을 감

안할 때 실제 대기 상태를 다른 지수 산정방식에 비해 비교적 잘 표현하고 있다고 생각된다.

그렇지만 이 PSI 지수 산정방식을 제주지역 대기질 평가에 보다 적극적으로 활용하기 위해서는 환경기준 및 대기질 측정항목에 TSP와 PM10에 근거한 환경기준의 수정이 따라야 할 것이고 그에 따라 현재 제주지역 2개의 대기질 측정소에서 각기 TSP와 PM10으로 측정항목이 불일치된 점이 시급히 개선되어야 할 것으로 생각된다. 그리고 우리 나라의 경우에도 환경기준에 PM2.5항목을 추가하는 사항을 깊이 있게 연구할 필요가 있을 것이라고 생각된다. 그와 아울러 각 측정 항목의 결측 일수를 줄이는 지속적인 노력을 기울여야 함은 물론이고 대기질 측정망을 보다 증설하여 운영하므로써 제주도 전체 대기질을 심도 있게 평가하기 위한 노력을 경주하여야 할 것이다. 그리고 제주도 지역 대기환경기준과 연계된 대기질 지수설정에 관해 깊이 있는 검토가 필요하다고 판단된다.

결 론

제주시 지역의 대기질을 평가하기 위해 1996년부터 1998년까지 3년 동안에 한 시간 단위로 측정된 대기오염물질 농도자료를 토대로 하여 1998년에 새롭게 개정된 PSI 지수산정방식을 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 제주시 이도동 지역의 평균 부유분진의 농도는 $36.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM10), SO_2 는 6.69 ppb, NO_2 는 13.75 ppb, O_3 는 29.79 ppb, CO는 0.62 ppm이었으며, 봄철에 PM10과 O_3 의 농도가 높은 경향을 보였다.
2. 지난 3년간의 제주시 대기질을 PSI 지수로 평가할 때, 주로 "good" 등급의 대기질을 보였고, 주요오염물질로서는 PM10이 58.2%로 가장 큰 비중을 차지하였고, O_3 이 36.85%로 다음을 차지하고 이어서 SO_2 , 그리고 CO의 순이었다. 그러나 NO_2 는 주요오염물질로 선정된 적이 없었다. 조사기간 중 "very unhealthy" 및 "hazardous" 등급을 보인 경우는 총 32회(0.17%)에 불과하였으며 이 경우 주요오염물질은 거의 PM10이었다. 주요오염물질로서 오존이 특

히 봄철에 비교적 자주 나타나기도 했지만 그럼에도 불구하고 제주시의 대기질은 대부분이 양호한 상태였던 것으로 평가되었다.

3. PSI 지수값에 대해서 시간별 평균 최고치는 11시에 나타났으며, 월별 평균치로는 5월에 최고치를 보였다.
4. 청정한 대기질을 보이는 제주시 지역에서 수정된 PSI 지수를 적용함에 있어 AI와 AEI와 같은 다른 대기질 지수의 적용시와는 달리 황사시와 같이 일시적으로 대기질이 악화되는 상태 또는 오존 농도가 증가하는 상황을 비교적 잘 반영하는 것으로 평가할 수 있었다.

참고문헌

- Angle, R. P. and H. S. Sanshu, 1989. Urban and rural ozone concentrations in Alberta, Canada. *Atmospheric Environment*, 23, 215~221.
- Eder, B. K., J. M. Davis and P. Bloomfield, 1993. A Characterization of the spatiotemporal variability of non-urban ozone concentrations over the eastern united states. *Atmospheric Environment*, 27, 2645~2668.
- EPA, 1978. Rapid Techniques for Calculating the Pollutants standards index. 1~8.
- EPA, 1976. Guideline for public reporting of daily air quality pollutant standards index. 450/2-76-103.
- EPA, 1998. Federal Register, 63(236), 67818-67834.
- Inhaber, H., 1974. Environmental Quality : Outline for a National Index for Canada. *Science*, 186, 801~803.
- Sunwoo, Y., G. R. Carmichael and H. Ueda, 1994. Characteristics of background surface ozone in Japan. *Atmospheric Environment*, 28, 25~37.
- Wakamatsu, S., I. Uno, H. Ueda and K. Uehara, 1989. Observational study of stratospheric ozone intrusions into lower troposphere. *Atmospheric Environment*, 23, 1815~1826.
- 국립환경연구원, 1990. 환경지표의 종합체계의 기법개

- 발 및 활성방안에 관한 연구(I). 과학기술처 보고서.
- 신찬기 · 한진석 · 김윤신. 1992. 대기오염 농도와 기상 인자의 관련성 연구. 한국대기보전학회지, 8(4), 213~220.
- 양병이. 1981. 환경지표를 활용한 도시환경 실태 분석에 관한 연구. 환경농촌, 8, 54~65.
- 이도철. 1995. 대기질 지수 산정방식에 의한 대기질 평가. 석사학위논문, 경성대학교 산업대학교, 4~34, 41~46.
- 정병일 · 김유근 · 이화운. 1994. 부산지역의 SO₂ 농도 변화 특성에 관한 고찰. 한국대기보전학회지, 10(4), 245~251.
- 정용승 · 윤마병. 1994. 황사의 사례분석과 한반도 유입량. 한국대기보전학회지, 10(4), 233~244.
- 허철구 · 이기호 · 박용이. 1997. 대기환경지수를 이용한 제주지역 대기질 평가에 관한 기초적 연구. 환경연구논문집, 제주대학교 환경연구소, 87~101.
- 日本化學會. 1974. 環境質の指標. 丸善株式會社. 1~15, 197~210.
- <http://www.EPA.gov/airprogram/oar/oaqps/airnow/sdrftpsi.html>
- <http://www.EPA.gov/airprogram/oar/oaqps/psi.html>
- <http://www.EPA.gov/ttn/oarpg/t1/memoranda/rprtguid.pdf>