

시군별 이산화황 (SO₂) 오염도의 현황 진단과 장기 예측에 관한 연구

A Study on Estimations and Long-term Forecasts of SO₂ Pollution in Each City & County of Korea

김 용 준

기상청 응용기상국

(1996년 7월 8일 접수, 1997년 2월 5일 채택)

Yong-Joon Kim

Applied Meteorology Bureau, Korea Meteorological Administration

(Received 8 July 1996, accepted 5 February 1997)

Abstract

It is more likely that the degree of air quality degradation that we have faced would be much less, if integrated management of air pollution control and assessment had been fully enforced by the local administrations, not by the centralized environmental agency in the first place. As the selfgoverning local administrations have been established since 1995, the need for air quality control by the local administration or local agency is getting the ground. However, in practice, air quality control by the local administration rarely put into effect due to lack of basic data which cover the present trends of air quality in each local city or county and are necessary for decision making.

The emissions of SO₂ in each city and county of Korea in 1993 were calculated in this study, based on energy consumptions and emission factors. The ambient concentrations of SO₂ also were estimated by applying modified Miller-Holtzworth model. Observed and estimated concentrations of SO₂ showed that about 17.5 percents of cities and counties in the country were more polluted than the target value, 20ppb/year.

The emissions and ambient concentrations of SO₂ in each city and county in 2000, 2005, and 2010 were also forecasted, assumed business as usual senario. It was shown that, in 2010, the emissions of SO₂ will be 2.8 times more than those of 1993 and much of them are from industrial sector. Also shown that 38.3 percents of cities and counties will be more polluted than the target value and most of them are polluted areas in 1993.

The methods and results of this study could be used in developing the efficient reduction strategies in each city and county.

Key words : SO₂, estimation, long-term forecast, emissions, concentrations, city & county

1. 서 론

좋은 환경에 대한 요구가 커짐에 따라 환경질 개선을

위한 여러가지 정책들이 개발, 시행되고 있으나, 환경질은 더 악화되고 있는 추세이다. 대기질도 개선되지 않고 계속 혼탁해 지고 있으므로, 현재의 대기질을 효율적으로 개선하기 위한 새로운 정책이 개발, 시행되고 기술과

제도가 이를 뒷받침할 수 있는 여건이 마련되어야 한다.

다른 환경분야와 마찬가지로, 대기질도 영향권별로 관리될 때 뚜렷한 개선을 기대할 수 있다. 그러나 1980년에 환경청이 설립되어 대기질 관리가 본격적으로 시작된 이래 영향권별 관리보다는 서울과 같은 대도시 중심 또는 전국 단위로 관리되어 왔다. 그 결과 일부 대도시에서는 이산화황과 총부유먼지의 오염도가 개선되었으나 기타 지역에서는 뚜렷한 개선이 이루어지지 않았다.

지방자치단체가 정식 출범하여 지역별 행정이 어느정도 이루어지고 있는 현 시점에서, 대기질 관리도 중앙정부에서 획일적으로 하기 보다는 각 지자체에 일임해야 할 것이다. 또한, 지자체는 지역 대기질을 스스로 관리할 수 있는 능력을 갖추어야 할 것이다. 지자체가 지역의 대기질을 스스로 관리함으로써 지역 대기질을 개선시키기 위해서는 관할 구역내 대기질을 정확하게 진단하고 장기 예측하여 지역 실정에 적합하고 효율적인 정책을 개발, 시행해야 한다. 그러나 이 과정에서 많은 연구와 기초자료가 필요하나 기초자료는 물론 관련 연구가 미비하였다. 따라서, 지자체가 지역 단위로 현황 진단 및 장기 예측하고 적합한 개선대책을 개발, 시행할 수 있게 하는 기술 지침서가 개발되어야 할 뿐만 아니라 필요한 기초자료들이 산출되어야 한다.

본 연구에서는, 배출량 및 오염도의 진단과 예측, 관리정책 개발과 시행이 비교적 쉬운 오염물질인 이산화황(SO₂)을 대상으로, 전국의 206개 시군 단위로 1993년의 배출량을 산출하고 대기오염도를 추정하여 현황을 진단하였다. 또한, 2010년까지 각 시군의 배출량과 대기오염도를 장기 예측하였다. 그래서, 각 지자체가 관할 구역내 이산화황 오염도를 개선시키기 위한 정책을 개발, 시행할 때 본 연구에서 개발한 방법을 하나의 지침서로 사용하며 산출된 자료들도 참조할 수 있게 하였다.

2. 시군별 이산화황 오염도의 현황 진단

2.1 오염도의 현황 진단 방법

오염물질의 대기 중 농도로 오염도를 진단하였다. 대기 중 농도는 지역의 대표 지점이라 할 수 있는 곳에서 측정하거나 모델을 이용하여 추정할 수 있다. 본 연구에서는 두가지 방법을 함께 사용하여 전국의 시군단위 오염도를 진단하였다.

지역의 오염도 분석 및 진단을 단순하게 하기 위해 오염도를 청정(clear), 우려(mild), 초과(exceed), 심각(severe)으로 세부 분류하였다. 현재의 장기환경기준치와 장래의 대기질 달성 목표치를 근거로 표 1과 같

이 세부 분류기준을 정했다. 장래 달성 목표치는 인체에 해로운 농도와 폭로시간에 근거하여 정한 WHO 권고치(15~23 ppb/년)를 참고하여 20 ppb/년으로 하였다.

Table 1. Concentrations of each class.

Class	Concentration (ppb)	Remarks
Clear	~10	less than half of target value
Mild	10~20	half to one of target value
Exceed	20~30	target value to present long-term standard
Severe	30~	more than present long-term standard

2.2 실측자료에 의한 현황 진단

1993년 현재 전국 30개 시군의 60개소에 대기오염물질 자동측정소가 환경부 및 지방자치단체에 의해 설치되어, 5개 환경기준 오염물질의 한시간 평균 오염도가 연속적으로 산출되고 있다. 따라서, 1개 이상의 자동측정소가 설치되어 있는 시군의 오염도 측정자료를 분석하여 진단하였다. 수도권, 광명, 성남과 대구, 울산시와 울산군 등 5개 시군이 현재의 장기환경기준치를 초과하는 심각지역으로, 서울을 포함한 수도권 도시들과 춘천, 충주, 구미, 군산, 익산, 포항, 부산 등 11개 시군이 초과지역으로, 과천, 강릉, 원주, 제천, 대전, 광주 등 13개 시군이 우려지역으로, 그리고 동광양시가 청정지역으로 분석되었다. 그래서 측정자료가 있는 시군만을 기준으로 평가하였을 때, 전국의 17% 지역이 심각지역, 37% 지역이 초과지역, 43% 지역이 우려지역, 4% 지역이 청정지역으로, 54% 지역이 목표치 미달성 지역으로 나타나 이산화황 오염이 심각한 것으로 진단되었다.

이와 같이 관측자료를 이용한 오염도의 진단이 심각한 것으로 나타난 이유는, 일반적으로 대기오염 자동측정소는 오염도가 상대적으로 높은 대도시와 공단지역에 설치되어 있기 때문이었다.

2.3 모델자료를 이용한 현황진단

위에서 알 수 있듯이, 실측자료만 사용해서는 전국의 오염 현황을 정확하게 진단할 수 없었다. 또한, 측정자료가 없는 지역에 대한 진단이 불가능하여 전국을 자세하게 진단할 수 없었다. 따라서, 실측자료를 포함한 더 많은 정보를 사용해야 정확하며 자세한 진단이 가능하

다. 한 지역의 대기오염도는 오염물질의 지역내 배출량,

주변 지역과의 유입 또는 유출량, 화학반응 등에 의한 생성 또는 소멸량, 건조 및 습윤 침적량 등에 의해 결정된다. 따라서, 각 항목의 크기와 기여율을 안다면 그 지역의 오염도를 산출할 수 있다. 현재, 많은 연구 및 실용분야에서 각 항목이 포함된 수치모델을 이용하여 지역의 오염도를 산출하고 있다. 그래서 본 연구에서도 사용 가능한 자료를 최대한 사용하여 간단한 확산모델로 각 시군의 오염도를 산출하였다.

2.3.1 오염도 산출 모델

비반응성 오염물질의 장단기 오염도 산출에 주로 이용되며 우리 지형에 더 적합하게 수정된 Miller-Holtzworth 모델(장영기, 1995)을 오염도 추정모델로 사용하였다. 오염물질의 세로방향 확산을 고려하지 않으며, 모든 오염물질이 지표면 높이에서 배출되고 대기안정도가 D등급이며 수직확산계수를 $\sigma_z = 0.91X^{0.702}$ 라 가정하면, 지역의 연평균 대기오염도 C_v 는

i) $S < X$ 인 경우

$$\frac{C_v}{Q} = \frac{2.27}{U} S^{0.298} \quad (1)$$

ii) $S \geq X$ 인 경우

$$\frac{C_v}{Q} = \frac{S}{2UH} + \left(\frac{1.96H^{0.425}}{U} \right) - \left(\frac{0.19H^{1.849}}{US} \right) \quad (2)$$

이다. 여기에서,

$$X = 0.832H^{1.425} \quad (3)$$

이며,

C_v : 풍하방향의 평균농도 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

S : 지역 면적의 가로축 길이 (m)

H : 평균 혼합고 (m)

U : 평균 풍속 (m/s)

Q : 오염물질 배출량 ($\text{g}/\text{s} \cdot \text{km}^2$)

이다. 따라서, 이 모델은 각 시군의 면적, 이산화황의 연간 배출량, 연평균 혼합층 높이와 풍속자료가 있으면 연평균 이산화황 오염도를 산출할 수 있다.

2.3.2 연간 배출량 산출

다른 오염물질과는 달리 이산화황의 배출량은 사용 연료의 종류(황함량 포함)와 사용량에 의해 거의 결정된다. 그래서 연료 사용량만을 고려하여 각 시군의 연간 배출량을 산출하였다.

환경부에서 조사한 1993년 난방, 산업, 수송부문에서 사용된 연료의 종류와 그 양(환경처, 1994) 및 각 발전소에서 1993년에 실제 사용한 연료의 양과 종류(한국전력공사, 1994)를 표 2에 나타내었다. 총 연료 사용량은 96.0 mtoe로 산업부문이 31.2%로 가장 많고 나머지 부문들은 서로 비슷한 양을 사용하였다. 연료별로는 황함량 0.2% 경유와 1.6% BC유가 각각 17.6, 14.1 mtoe로 많은 부분을 차지하였다.

15개 광역시·도 단위의 난방, 산업, 수송부문 사용 연료 종류와 연간 사용량을 종별 대기오염물질 배출업소 수, 인구 수, 자동차 등록대수(한국도시행정연구소, 1994, 1995) 등의 자료를 기초로, 다음 식 (4)~(8)의 방법으로, 전국 206개 시군에 배분하였다. 저황연료와 청정연료인 천연가스 사용량을 배분할 때에는 대기환경보전법에 규정된 경유와 중유의 저황유 사용의무지역과 액화천연가스 사용의무지역을 적용하였다.

난방부문의 연료 사용량은 인구 수의 비율에 따라, 각 시군의 난방부문 연료 종류별 사용량을 다음 식 (4)에 의해 산출하였다. 즉,

$$\begin{aligned} & \text{시·군 난방부문 연료 사용량} \\ &= \text{광역시·도 사용량} \times \frac{\text{시·군 인구수}}{\text{광역시·도 인구수}} \quad (4) \end{aligned}$$

산업부문의 연료 사용량은 주로 1~5종의 배출업소에

Table 2. Energy consumptions in each sector in 1993 (Unit: mtoe for energy consumption and % for sulfur concentration of fuel).

Sector	Sub-total	Anth	Bitu	Gas	Kero	Light	Oil	BA	BB	BC			LNG	LPG	
						1.0	0.2			4.0	1.6	1.0			0.3
Heat	22.5	3.5			5.9	.4	5.2	.0	.0	.3	1.5	.3	.1	2.1	3.2
Indus	30.0	.0	14.9			.8	2.6	.2	.2	3.1	6.2	1.0	.4	.4	.2
Trans	20.4			5.6		1.2	9.6	.2	.0	2.2	.0				1.5
Elect	23.1	1.0	9.2			.3	.1				6.3	.2	1.7	4.3	
Total	96.0	4.5	24.1	5.6	5.9	2.7	17.6	.4	.2	5.7	14.1	1.4	2.3	6.7	4.9

서 사용하므로 각 시군내에 등록된 종별 배출업소 수의 함수로 배분하였다. 대기환경보전법에 규정된 각 종별 연료 사용량의 중간값을 그 종의 평균 연료 사용량으로 가정하고, 5종의 평균 연료 사용량 100 ton/년을 1로 한 후, 각 종의 평균 연료 사용량과 5종의 평균 연료 사용량의 비로 표 3과 같은 가중치를 두었다. 다만 1종 배출업소의 평균 연료 사용량은 외삽하여 15,000 ton/년으로 하였으므로 가중치는 150이었다.

Table 3. Weighing values of each class of facilities (Unit: converted ton/year to solid fuel for fuel consumption).

Class	Fuel Consumptions	Weighing Value
1	10,000~	150
2	2,000~10,000	60
3	1,000~ 2,000	15
4	200~ 1,000	6
5	~ 200	1

그래서 다음 식 (5)와 같이 각 시군 내에 있는 종별 배출업소 수와 가중치를 곱하여 대기배출지수를 계산하였다.

$$\text{대기배출지수} = \text{종별 배출업소 수} \times \text{가중치} \quad (5)$$

각 시군의 산업부문 연료 사용량을 다음 식 (6)과 같이 대기배출지수의 비로 산출하였다.

$$\begin{aligned} & \text{시·군 산업부문 연료 사용량} \\ &= \frac{\text{광역시·도}}{\text{사용량}} \times \frac{\text{시·군 대기배출지수}}{\text{광역시·도 대기배출지수}} \quad (6) \end{aligned}$$

수송부문의 사용 연료중 휘발유와 경유, LPG는 주로 자동차 부문에서 사용하므로 자동차 수의 비로(식 (7)),

중유는 주로 선박에서 사용하므로 각 항구의 입출항 톤 수의 비(식 (8))로 배분하였다.

$$\begin{aligned} & \text{시·군 수송부문 휘발유, 경유, LPG 사용량} \\ &= \frac{\text{광역시·도}}{\text{사용량}} \times \frac{\text{시·군 자동차 등록대수}}{\text{광역시·도 자동차 등록대수}} \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{시·군 수송부문 중유 사용량} \\ &= \frac{\text{광역시·도}}{\text{사용량}} \times \frac{\text{시·군 입출항 톤수}}{\text{광역시·도 입출항}} \quad (8) \end{aligned}$$

시군의 발전부문 연료 사용량은 각 시군에 있는 각 발전소에서 1993년도에 실제 이용한 연료량으로 하였다(한국전력공사, 1994).

각 시군의 연료 사용량에 국내에서 산출한 발전부문 배출계수와 미국 환경보호청(US Environmental Protection Agency (EPA), 1985, 1986, 1988, 1990, 1991, 1992, 1993)의 배출계수(김용준, 1995)를 곱하여 각 부문별 이산화황 배출량을 산출하였다.

1993년도 전국의 부문별, 연료별 이산화황 배출량을 표 4에 나타내었다. 총 배출량은 156.1만톤으로 산업부문에서 51.2%가 배출되었고 발전, 수송, 난방의 순으로 배출되었다. 연료별로는 유연탄과 4.0%와 1.6% BC 유에서 각각 40여만톤씩 배출되었다.

1993년도에 각 시군의 단위 면적당 배출된 총량을 그림 1에 나타내었다. 수도권(서울, 인천, 안산, 수원 등), 충청 북부권(천안, 충주, 청주 등), 서해 중부권(보령, 군산 등), 전북권(익산, 전주 등), 서해 남부권(목포 등), 남해 서부권(여천, 동광양 등), 남해 동부권(부산, 마산 등), 동해 남부권(울산, 포항 등), 경상 내륙권(구미, 대구, 경산 등), 영동권(강릉 등), 영서권(춘천 등)과 같은 공단 및 발전소 지역에서 50 ton/km²/년 이상의 많은 양이 배출되었다. 또한, 대전, 광주, 원주 등의 도시 지역에서도 10 ton/km²/년

Table 4. Emissions of SO₂ in each sector in 1993 (Unit: kton for emissions and % for sulfur concentration of fuel).

Sector	Sub-total	Anth	Bitu	Gasol	Kero	Light	Oil	BA	BB	BC		LNG		LPG	
										4.0	1.6	1.0	0.3		
Heat	197	80			9	7	19	1	2	26	46	6	1	0	0
Indus	800	1	308			16	10	6	6	242	192	18	2	0	0
Trans	237			4		22	36	6	1	167	1				0
Elect	326	31	116			6	0				160	3	10	0	
Total	1,561	111	424	4	9	52	52	13	8	436	399	27	13	0	0



Fig. 1. Total emissions (ton/km²/year) of SO₂ in each city and county in 1993.

이상이 배출되었다.

2. 3. 3 연평균 기상자료 산출

1983~1988년의 전국 72개 기상관측소에서 측정된 지상기상자료, 오산, 포항, 광주, 제주 기상대에서 측정된 상층기상자료 및 850 hPa 등압면에서의 한반도의 평균 지균풍 자료를 시간별, 계절별, 풍향·풍속별, 운량별로 분류하였다. 3차원 기상진단모델(박순웅, 1992, 1994)을 사용하여 각 시군에서의 바람과 혼합층 높이를 사례별로 계산한 후, 평균하여 연평균 혼합층 높이와 풍향·풍속을 산출하였다.

그림 2는 산출된 연평균 혼합층 높이(a)와 바람 분포(b)이다. 연평균 혼합층 높이는 해안과 평지 지역에서는 낮고 산악지역에서 높게 나타나 한반도에서 916~1,734m 범위를 보였다. 평균 바람의 주풍 방향은 서풍이며, 풍속은 혼합층 높이가 낮은 평지지역에서는 느리고 혼합층 높이가 높은 산악지역에서 빠르게 나타나 3.3~4.4 m/s 범위를 보였다.

2. 3. 4 시군별 연평균 이산화황 농도

산출된 각 시군의 배출량과 기상자료, 지역의 행정구역 면적을 수정된 Miller-Holtzworth 모델(장영기, 1995)에 입력하여 이산화황의 연평균 오염도를 추정하

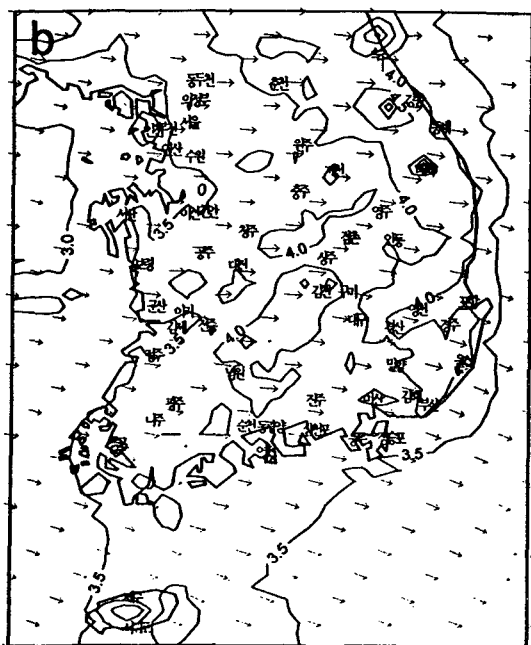
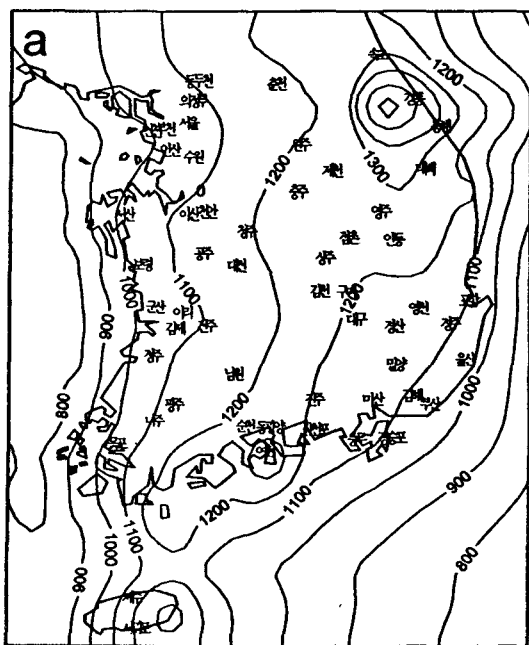


Fig. 2. (a) Annual mean mixed layer height (m) and (b) wind (m/s) calculated by a 3-dimensional diagnostic model. The arrows at (b) mean wind directions.

었다. 그러나 본 연구가 상대적으로 오염도가 높게 나타나는 주거 및 공업지역의 오염도 추정이 아닌, 산림 지역을 포함한 행정구역 전체의 장기간(1년) 평균 오염도 추정에 중점을 두었기 때문에, 일반적으로 Miller-Holtzworth 모델을 사용할때의 배출원지역 면적 대신에, 행정구역 전체 면적을 사용하였다.

연료 및 배출량 산출과정, 기상자료 산출과정, 모델에 사용된 가정들과 모델의 불완전함 등과 같은 원인으로 인해 추정농도가 지역 평균값을 정확하게 나타낸다고 할 수 없다. 또한, 측정소 수와 위치, 측정기기의 불완전함 등으로 측정농도도 지역 평균값을 정확하게 나타낸다고 할 수 없다. 그래서 두 자료의 정보를 최대한 활용하되 측정자료에 우선권을 주어 다음과 같은 방법으로 수정된 추정자료를 산출하였다. 즉, 측정소가 있는 시군에 대해 측정된 이산화황의 연평균 농도와 모델에 의해 산출된 농도의 비를 계산하였다. 측정소가 있는 시군은 모델 산출 농도에 해당 시군의 측정 농도/모델 산출 농도의 비를 곱하여 측정자료를 그 시군의 연평균 농도로 하였다. 측정자료가 없는 시군은 모델 산출 농도에 전국 평균의 측정 농도/모델 산출 농도의 비를 곱하여 그 값을 수정함으로써 최종 추정자료를 산출하였다. 참고로, 측정소 위치가 주로 오염도가 높은 지역이므로 지역내 평균 오염도보다 높게 나타나고 Miller-Holtzworth 모델 영역을 행정구역 전체로 하였기 때문에 전국의 전 지역에서 측정 오염도가 모델 산출 오염도보다 크게 나타났으며(30개 지역을 대상으로 한 전국 평균 측정 오염도와 모델 산출 오염도는 각각 22.2, 18.8 ppb/년이었음), 그래서 전국 평균 보정 비율은 1보다 큰 4.1이었다.

그림 3는 수정된 1993년도의 연평균 이산화황 오염도 추정값이다. 측정소가 있는 30개 지역은 물론 측정소가 없는 지역의 값도 알 수 있어 지역별 오염도를 자세하게 분석할 수 있었다. 또한, 발전소, 공단 등 거대한 배출원이 있는 지역은 초과 및 심각지역으로, 전원지역과 같이 배출량이 적은 지역은 청정지역으로 분류되는 등 합리적 진단이 가능하였다. 현재 측정소가 설치되지 않았지만 심각지역인 곳은 천안, 아산, 보령, 목포, 진주, 마산 등으로 이 지역은 측정소가 우선 설치되어야 할 곳임도 알 수 있었다.

측정자료 만을 사용한 오염도 진단과는 달리, 14개 시군이 심각지역으로 나타나 전국 206개 시군 중 6.8%를 차지하였고, 초과지역은 22개 시군으로 10.7%, 우려지역은 26개 시군으로 12.6%, 나머지 144개 시군이 청정지역으로 69.9%를 차지하였다. 따라서 전 국토의 7

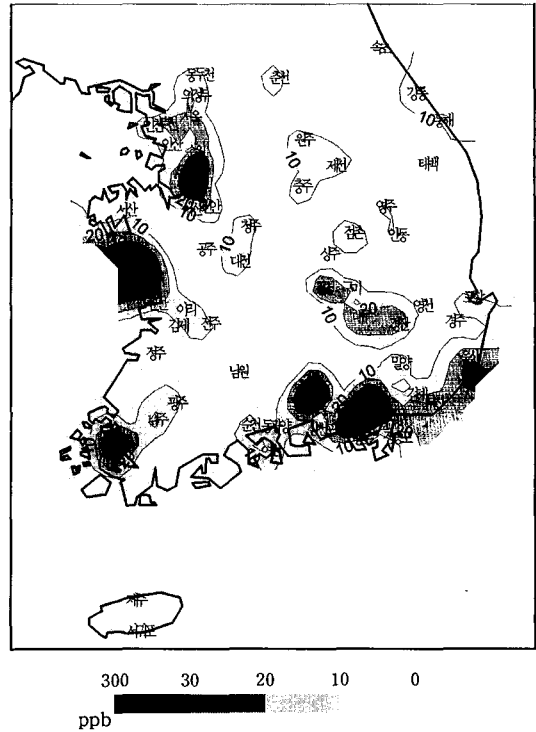


Fig. 3. Estimated ambient concentrations (ppb) of SO₂ in 1993.

할이 이산화황 오염도에 대해서는 청정지역이지만, 17.5% 지역이 목표치를 초과하는 것으로 추정되었다.

초과 및 심각 지역은 수도권(서울, 인천, 안산, 수원 등), 충청권(아산, 천안 등), 서해 중부권(보령, 군산 등), 서해 남부권(목포 등), 남해 동부권(진주, 마산, 창원, 부산 등), 동해 남부권(울산 등), 경상 내륙권(구미, 대구, 경산 등)이다. 이 지역은 발전소, 공단 또는 대도시 지역으로 배출량이 많은 지역이다. 따라서 발전 및 산업 부문에서의 배출량 감소를 위한 대책이 시행되어야 할 지역들이다. 우리지역은 경기 북부권(동두천 등), 영서권(춘천, 원주, 제천, 충주 등), 영동권(강릉, 동해 등), 충청 내륙권(청주, 대전 등), 전북권(익산, 김제, 전주 등), 전남권(광주 등), 남해 서부권(여천, 동광양 등), 동해 남부권(포항 등), 경북권(점촌, 영동, 안동 등) 등의 지역이다. 이 지역은 도시지역으로 주로 중소기업 공단과 난방부문에서의 배출량에 의한 것으로 이 부문에서의 배출량 감소가 필요하다. 그 외 전원지역은 청정지역으로 나타나 이산화황 오염도가 심각하지 않은 것으로 판단되는 지역이다.

3. 시군별 이산화황 오염도의 장기 예측

각 지역의 대기오염도가 적어도 목표 연도까지는 목표치에 이르기 위한 정책을 수립할 수 있도록 하기 위해 2000, 2005, 2010년의 각 시군의 연료 사용량, 이산화황 배출량과 오염도를 예측하였다.

3.1 연료 사용량 장기 예측

에너지경제연구원에서 예측한 2030년까지의 장기 에너지 수요 전망자료(에너지경제연구원, 1994a)를 기초로, 전국 단위의 난방, 산업, 수송, 발전 부문별 연료 사용량을 산출하였다. 그러나 에너지경제연구원에서 사용한 단순한 고체, 액체 및 기체 연료 단위로는 배출량을 정확하게 산출할 수 없었다. 그래서 1993년의 현재 경우와 같이 14종류의 연료로 세분하여(표 3참고) 다시 계산하였다. 세분된 연료별 사용 비율은 현재의 사용량 비율(환경저, 1994)과 같게 하였고, 지역난방 부문과 같이 환경부 자료만으로 알 수 없는 부문에 대해서는 각 부문의 현재 연료 사용량(에너지경제연구원, 1994b)을 추가 조사하여 배분하였다.

전국 단위의 각 부문별 연료 사용량을 그림 4(a)에 나타내었다. 1993년의 총 사용량은 96.0 mtoe였으나 2000, 2005, 2010년 사용량은 각각 181.8, 220.4, 259.3 mtoe으로, 1993년에 비해 각각 1.9, 2.3, 2.7 배 증가할 것으로 예측되었다. 2010년의 난방, 산업, 수송, 발전부문의 각 부문별 증가률이 각각 1.5, 3.9, 2.8, 2.3으로, 산업과 발전부문의 연료 사용량 증가가 뚜렷할 것으로 예측되었다.

전국 단위의 연료 사용량을 현재의 경우와 비슷한 방법(식 (4)~(8))으로 각 시군에 배분하였다. 난방, 산업, 수송부문은 각각 예측 연도의 인구 수, 종별 배출업소 수에 근거한 대기배출계수, 자동차 등록대수에 비례하여 배분하였는데, 예측 연도의 자료는 지난 4, 5년간의 각 시군별 자료(한국도시행정연구소, 1994, 1995)를 근거로 회귀식을 구한 후 외삽하여 장기 예측하였다. 다만 분당, 일산과 같은 신도시 건설, 군장 공단과 같은 신공단지 건설 등 급격한 자료의 증감이 있거나 신규 발전계획이 수립된 지역에 대해서는 그 지역의 장기 발전계획에 근거하여 예측자료를 보완하였다. 발전부문은 기존 발전소의 수명을 30년으로 가정하고 한국전력공사의 신규 발전계획(한국전력공사, 1995)에 따라 각 발전소의 총 발전량을 산출한 후, 각 발전소의 발전량에 비례하여 발전부문 연료 사용량을 배분하였다. 연료 배분시에는 현재의 저황연료 및 청정연료 사용의무지역 규정을 준수

하였다.

3.2 배출량 장기 예측

각 시군에 배분된 부문별, 연료별 연료 사용량에 배출계수(김용준, 1995)를 곱하여 배출량을 예측하였다. 이 과정에서 탈황시설 설치, 연료중 황함량 감소 및 저황연료 공급지역 확대, 청정연료 공급 확대, 총량규제 실시 등과 같이 앞으로 있을 규제 강화와 기술개발에 의해 이루어질 배출량 저감대책 효과는 고려하지 않고 현재의 규제 및 기술이 지속된다는 가정하에 이루어졌다.

전국의 예상 이산화황 총 배출량을 그림 4(b)에 나타내었다. 2000, 2005, 2010년도의 총 배출량은 각각 321.2, 381.9, 443.9 mton으로 전망되어, 1993년의 156.1mton에 비해 각각 2.1, 2.4, 2.8배 증가로 연료 사용량 증가율과 유사한 값을 보였다. 목표 연도인 2010년의 산업부문 증가율이 4.2배로 매우 높게 전망되는데, 이것은 중유의 사용량이 크게 증가할 것으로 예측되었기 때문이었다. 수송과 발전부문은 약 1.6배 가량 증가할 것으로 예측되었다. 그러나 난방부문은 청정연료의 사용량이 늘어 오히려 배출량이 줄 것으로 예측되었

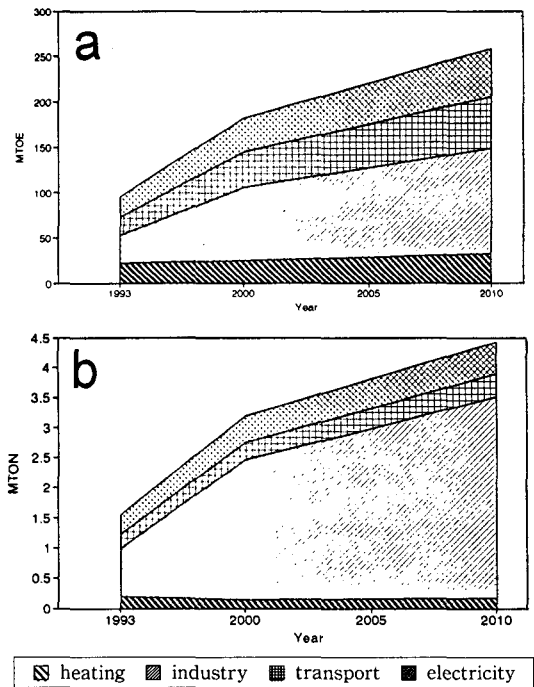


Fig. 4. (a) Forecasted energy consumptions (mtoe/year) and (b) emissions (mton/year) of SO₂ in each sector in the country.

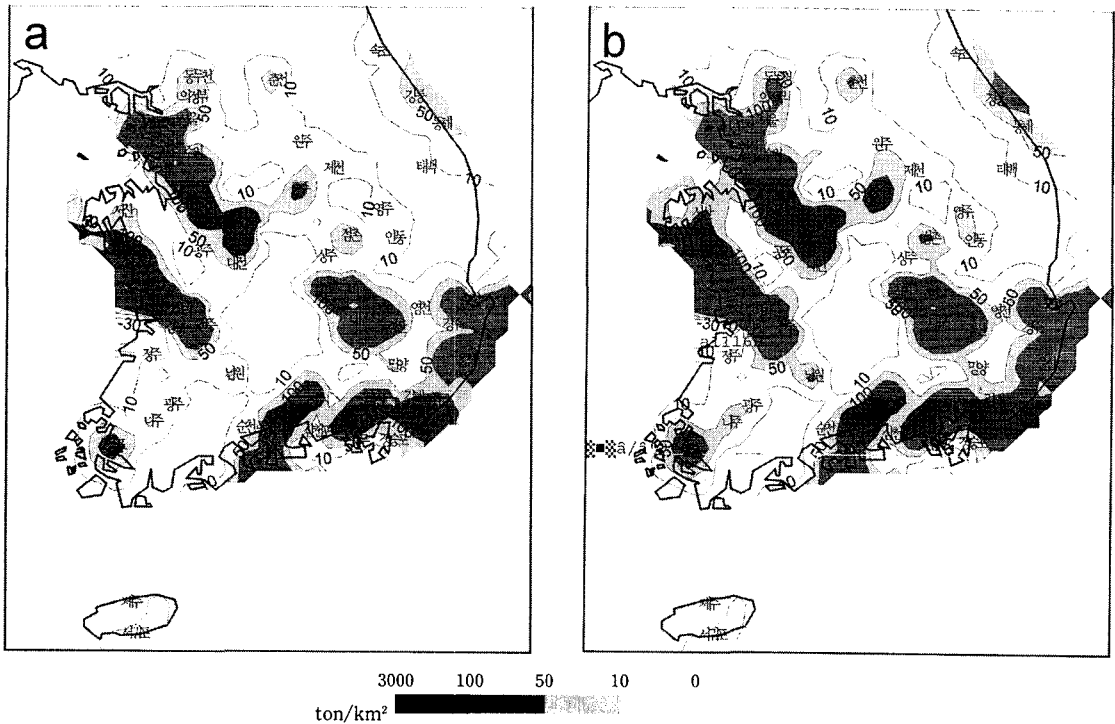


Fig. 5. Forecasted total emissions (ton/km²/year) of SO₂ in each city and county in 2000 (a) and in 2010 (b).

다. 2000년과 2010년의 각 시군별 단위면적당 예상 배출량을 그림 5(a), (b)에 나타내었다. 그림 1의 1993년 경우와 비교하여 대부분 지역에서 배출량이 증가하였고, 10 및 50 ton/km² 지역도 확장되어 나타났다. 특히, 서해안 지역과 같은 신규 개발 예상지역의 배출량 증가가 뚜렷할 것으로 예측되었다. 청정지역이던 제주도도 발전량 증가로 인해 배출량도 증가할 것으로 예측되었다.

3.3 오염도 장기 예측

시군별 이산화황 예상 배출량(그림 5(a), (b))과 행정구역 면적 그리고 연평균 혼합층 높이와 풍속자료를 수정된 Miller-Holtzworth 모델(장영기, 1995)에 입력하여 2000, 2005, 2010년의 이산화황 오염도를 장기 예측하였다. 2010년까지는 큰 기후변화가 일어나지 않는다고 보아 현재의 연평균 혼합층 높이와 풍속자료(그림 2(a), (b))를 그대로 사용하였다. 또한, 현재 오염도(그림 3)와 비교하기 위해 현재의 측정 농도/모델 산출 농도의 비인 보정비율로 예측자료를 보정하였다.

그림 6(a), (b)는 2000년과 2010년의 연평균 이산

화황 오염도 예측값으로, 예상 배출량 분포(그림 5(a), (b))와 비슷한 분포를 보였다. 1993년 추정 오염도(그림 3)와 비교하여 전국적으로 오염도가 증가할 것으로 예측되었다. 2000년보다는 2010년의 증가량이 더 커 시간이 지날수록 오염도가 더 악화될 것임을 보였다. 목표 연도인 2010년에는 심각지역이 62개 시군으로 늘어 전국의 30.1%를 차지할 것이며, 초과지역은 8.2%, 우려지역은 18.6%, 청정지역은 48.1%를 차지할 것으로 전망되었다. 그래서 목표치를 초과하는 지역이 모두 38.3%로, 1993년의 17.5%에 비해 2배 이상 증가할 것으로 나타났다. 특히, 1993년에 초과 또는 심각지역이던 지역의 오염도가 크게 높아지고 그 영역권도 크게 확장될 것으로 예상되었다. 수도권과 서해안 지역, 영서 내륙과 영동지역이 새로운 심각지역이 될 것으로 전망되며, 청정지역이던 제주시도 우려지역으로 악화될 것으로 예측되었다.

4. 결 론

각 지방자치단체가 지역에 적합한 대기질 관리정책을 개발, 시행할 수 있도록 대표적인 대기오염물질인 이산

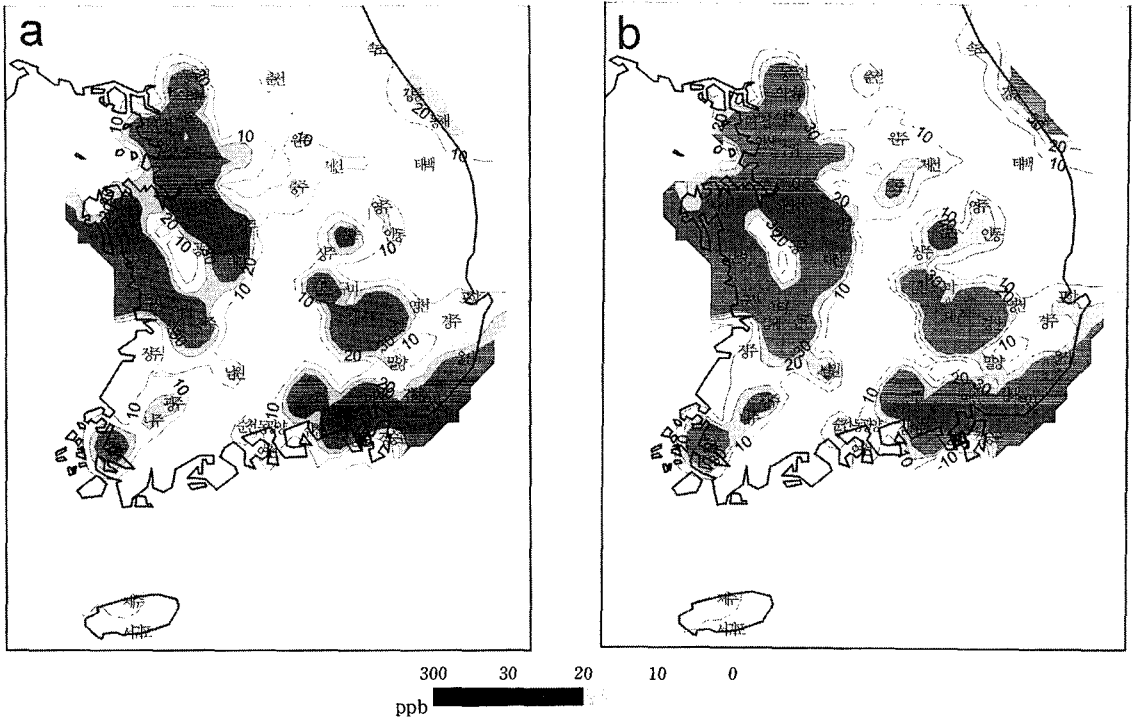


Fig. 6. Forecasted ambient concentrations (ppb) of SO₂ in 2000 (a) and in 2010 (b).

화황 오염도를 시군 단위로 현황 진단하고 장기 예측하는 방법을 제시하였고 개선정책의 개발에 필요한 기초자료들을 산출하였다.

광역시·도 단위의 연료 사용량과 시군 단위의 인구 수, 종별 배출업소 수, 자동차 등록대수와 입출항 톤수, 발전량 등에 근거하여 각 시군의 1993년 이산화황 배출량을 산출하였고, 확산모델을 사용하여 대기오염도를 추정하여 현황 진단하였다. 측정자료만을 이용한 진단보다는 모델 산출자료를 함께 사용하여 추정한 자료로 진단하였을 때 더 합리적이며 세세한 진단이 이루어졌다. 현황 진단 결과, 전국의 17.5% 지역이 목표치를 초과하였는데, 주로 공단과 발전시설이 있는 시군지역이 목표치 초과지역으로 나타나 산업 및 발전부문에서의 배출량 감소가 필요함을 보였다.

장기 에너지 수요 전망과 인구 수, 종별 배출업소 수, 자동차 수 및 예상 발전량 자료를 사용하여 2000, 2005, 2010년의 시군별 배출량과 오염도를 예측하였다. 목표 연도인 2010의 연료 사용량은 1993년에 비해 2.7배 증가하며, 특히 산업부문 사용량이 크게 (3.9배) 증가할 것으로 전망되었다. 이산화황의 총 배출량은 2.8배 증가할 것이며, 산업부문 증가율이 4.2배로 예상되

어 이 부문에서 배출량을 감소시켜야 함을 보였다. 2010년에 목표치를 초과할 것으로 예측되는 시군은 전국의 38.3% 지역으로 1993년에 비해 2배 이상 증가할 것으로 전망되었다. 또한, 1993년에 목표치를 초과하던 지역의 오염도가 크게 높아지고 그 오염 영역도 확장될 것이며, 수도권, 서해안 지역, 영서내륙과 영동지역이 새로운 심각지역으로 악화될 것으로 전망되었다.

이후 연구에서 다음 사항들이 개선 또는 보완된다면 더 우수한 결과를 얻을 수 있을 것이다.

첫째, 시군별 배출량 추정은 부문별 연료 사용량에 근거하였는데, 시군별 연료 사용량이 조사되지 않아 인구 수, 종별 배출업소 수, 자동차 등록대수 등의 함수로 광역시·도의 연료 사용량에서 부터 산출하였다. 만일 현재 환경부에서 추진 중인 “국가 대기오염물질 배출원자료체계 구축사업(김용준, 1994, 1995)”이 완성되면 전국의 점, 면, 이동 및 생활오염원에서의 배출원자료를 이용할 수 있다. 시군 단위보다 더 작은 단위로, 그리고 이산화황은 물론 다른 기준오염물질에 대해서도 오염도 및 주요 원인분석이 가능하여 대기질을 총체적으로 관리, 개선할 수 있는 정책을 개발할 수 있을 것이다.

둘째, 대기 중 오염도 산출과정에서 사용한 Miller-

Holtzworth 모델은 간단한 모델로, 배출량과 기상자료를 입력하여 시군의 오염도를 쉽게 추정할 수 있는 장점이 있다. 그러나 이 모델에는 여러가지 가정이 사용되어 지역내 오염도를 정확하게 추정하였다고는 할 수 없다. 전국을 하나의 모델영역으로 하고 배출, 이류, 화학변환, 침적과정 등을 모두 계산할 수 있는 모델을 사용하면 대기오염도를 더 정확하게 추정할 수 있을 것이다. 그러나 이런 모델을 사용하기 위해서는 우선 화학변환량과 침적량과 같은 추가 자료가 보완되어야 한다.

셋째, 에너지 수요 전망, 인구 수, 종별 배출업소 수, 자동차 대수, 발전량과 같은 장기 예측자료를 산출하기 위해 획득 가능한 많은 자료를 이용하였다. 그러나, 더 세세하게 구분된 배분함수를 사용하고 신뢰도가 더 높은 자료를 사용한다면 장기 예측 자료의 신뢰도도 높아질 것이다. 그러기 위해서는 지방자치단체, 내무부, 환경부, 건설교통부, 통상산업부 등의 공공기관이 기초자료를 더 세세하며 정확하게 조사, 발표하여 더 많은 자료를 이용할 수 있게 해야 한다.

본 연구는 1993년의 현재 상태가 그대로 유지된다는 가정아래 2010년까지 장기 예측하였다. 연료 중 황함량 감소, 저황연료 및 청정연료 사용 의무화 지역과 시설 확대, 탈황시설 설치, 총량 규제 등의 규제 강화와 신기술 개발에 의한 저감 효과는 고려되지 않았기 때문에 실제와는 다를 수 있다. 따라서, 규제 강화와 신기술 개발에 의한 저감 효과가 고려된 장기 전망이 필요하다. 또한, 각 지역에 가장 효율적이며 비용효과가 높은 저감방안을 개발해야 지방자치단체의 대기질 개선대책 수립에 실제 도움이 될 것이다. 그리고 이산화황 이외의 대기오염물질에 대한 연구도 이루어져야 한다.

감사의 글

이 연구에 사용된 기상자료를 제공해 주신 서울대학교의 박순웅 교수와 수정된 Miller-Holtzworth 모델을 제공해 주신 수원대의 장영기 교수에게 감사드립니다. 오염도 자료를 제공하고 많은 조언을 해주신 환경부 대기정책과 여러분에게도 감사드립니다. 연구과정동안 기초자료 입력 등으로 도움을 준 김종구, 김현주씨에게도 감사의 뜻을 전합니다. 이 연구는 한국환경기술개발원의 "국토환경종합계획에 관한 연구"의 일부로 추진되었다.

참 고 문 헌

김용준(1994), 국가 대기오염물질 배출원자료체계 구축

에 관한 연구 I, 한국환경기술개발원 연구보고서, 132pp.
 김용준(1995), 국가 대기오염물질 배출원자료체계 구축에 관한 연구 II-점오염원 배출원자료 조사방법 개발, 한국환경기술개발원 연구보고서, 120pp.
 박순웅(1992), 정규기상관측자료를 사용하여 추정한 경제층내 바람구조, 한국기상학회지, 28(4), 417-433.
 박순웅(1994), 지상기상관측자료를 이용한 대기질 시물레이션, 한국기상학회지, 30(3), 469-486.
 에너지경제연구원(1994a), 장기 에너지 수요 2030, 에너지경제연구원 연구보고서, 경기 의양.
 에너지경제연구원(1994b), 지역난방 및 도시가스난방의 경제성 분석과 향후 역할분담 연구, 에너지경제연구원 연구보고서, 경기 의양, 311pp.
 장영기(1995), 국내 적용을 위한 Miller-Holtzworth 모델의 수정, 한국대기보전학회지, 11(3), 299-302.
 한국도시행정연구소(1994), 전국통계연감 상·중·하, 한국도시행정연구소, 서울, 2921pp.
 한국도시행정연구소(1995), 전국통계연감 상·중·하, 한국도시행정연구소, 서울, 2976pp.
 한국전력공사(1994), 발전연보.
 한국전력공사(1995), 한국전력 장기전원계획.
 환경처(1994), 대기오염물질 배출량-1993, 89pp.
 EPA(1985), *Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume I: Point and Area Sources, Fourth Edition, AP-42*, US Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, USA.
 EPA(1986), *Supplement A to Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume I, Fourth Edition, AP-42*, US Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, USA.
 EPA(1988), *Supplement B to Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume I, Fourth Edition, AP-42*, US Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, USA.
 EPA(1990), *Supplement C to Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume I, Fourth Edition, AP-42*, US Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, USA.
 EPA(1991), *Supplement D to Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume I,*

Fourth Edition, AP-42, US Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, USA.

EPA (1992), *Supplement E to Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume I, Fourth Edition, AP-42*, US Environmental Protection Agency, Research Trian-

gle Park, NC, USA.

EPA (1993), *Supplement F to Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume I, Fourth Edition, AP-42*, US Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, USA.