

부산 지역의 SO₂ 농도 변화 특성에 관한 고찰

On the Characteristics of the SO₂ Concentration Variation in Pusan, Korea

전 병 일 · 김 유 근 · 이 화 운

부산대학교 대기과학과
(원고접수: 1994. 6. 28)

Byung-II Jeon, Yoo-Keun Kim and Hwa-Woon Lee

Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Pusan, Korea
(Received 28 June 1994)

Abstract

We considered that characteristics of SO₂ concentration level and relations of the meteorological parameters and high pollution concentration from the data measured 7 air quality continuous monitoring stations during 4 years, from 1990 to 1993 in Pusan.

The SO₂ concentration level showed decreasing trend yearly, it was maximum in Winter, minimum in Summer. The time of SO₂ peak concentration lagged from seashore to land because of break-down of the nocturnal inversion layer and seabreeze. The correlations of daily SO₂ value between various air quality continuous monitoring stations were highest between Beomcheondong and Meongryundong, lowest between Daeyeondong and Sinpyeongdong because of difference of air pollution emission sources characteristic.

The meteorological parameters affecting SO₂ concentration level were minimum temperature, relative humidity, wind speed and air pressure. The SO₂ high pollution (≥ 95 ppb) occurred almost in Winter, particularly in such day showing lower wind speed and higher air pressure. Elementary SO₂ high pollution predictor were high pressure system and stability of lower atmosphere.

1. 서 론

부산시는 1963년 직할시 승격 이후 급속한 발전을 거듭하여, 이제는 약 400백만의 인구를 가진 우리나라의 제2의 도시로 발전하였으며, 그에 따른 인구의 도시 집중과 석탄과 석유 등의 화석 연료의 소비 그리고 산업 사회로 인한 자동차의 증가로 부산지역의 대기 오염은 심각한 상태에 놓여 있는 실정이다.

특히 SO₂는 연료 중에 함유된 유황 성분이 연소될 때 산화되어 생성되는 무색의 물질로서, 호흡기를 자극하여 기관지염, 천식 그리고 폐기종을 일으키며, 식물의 잎맥사이에 반점을 일으키는 피해를

주기도 한다(Seinfeld, 1985). 그리고 SO₂가스가 대기로부터 세정되어 지표에 침적되면 산성비라는 중대한 환경오염을 유발한다(河村, 1979).

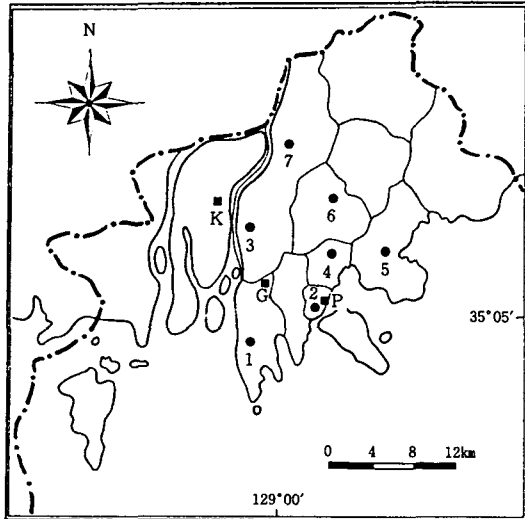
부산 지역의 SO₂농도에 관한 연구는 직접 관측한 자료를 분석한 박재림(1975)과 하수호 등(1993)의 연구가 있으며, 부산 지역의 대기 오염에 미치는 기상 인자에 관한 박종길(1993)의 연구가 있으나, 환경처의 대기 오염 자동 측정망 자료에 의해 SO₂ 농도를 기상 자료와 관련하여 체계적으로 분석한 사례는 전무한 실정이다.

본 연구에서는 부산시의 7개 대기 오염 측정망에서 측정된 SO₂농도 자료를 이용해 부산시의 SO₂농도의 월별·지역별 특성과 기상 인자와의 관련성 그

리고 SO₂ 고농도 발생시의 기상 특성 등을 고찰하는데 있으며, 앞으로 부산 지역의 합리적인 환경 기준의 설정과 배출 규제, 지역 계획 등 종합적인 대기 관리 계획 수립과 대기 오염 농도 예보에 도움이 되었으면 한다.

2. 자 료

본 연구에서 사용한 자료는 대기 오염 자료와 기상 자료로 나눌 수 있다. 대기 오염 자료는 환경청의 대기 오염 자동 측정소에서 측정된 1990년 1월부터 1993년 12월 31일까지의 4년간의 시간별 SO₂ 자료이며, 측정 장소는 그림 1과 같이 주거 지역이 3개소(명륜동, 대연동, 덕천동), 상업 지역이 2개소(광복동, 범천동) 그리고 공업 지역이 2개소(신평동, 감전동)이다(전병일 등, 1994).



- 1: Sinpyeongdong
- 2: Kwangbokdong
- 3: Gamjeondong
- 4: Beomcheondong
- 5: Daeyeondong
- 6: Meongryundong
- 7: Deokcheondong

Fig. 1. Map of the Pusan area. The air quality monitoring stations marked as 1~7 are operated by the Environmental Protection Administration. Station K is Kimhae air force meteorological station(6m). Stations P and G are Pusan meteorological Administration and Mt. Gudeok radar observatory station (540m), respectively.

기상 자료는 부산 지방 기상청에서 측정된 자료를 이용하였으며, 고농도일의 기상특성을 고찰하기

위해서 공군 김해 기상대와 구덕산 레이다 관측소의 자료도 이용하였다.

3. 부산 지역의 SO₂ 농도의 변화 특성

먼저, 최근 10년간 부산 지역의 SO₂ 농도의 경년 변화를 살펴보면, 그림 2와 같이 1984년에 50ppb에서 점차 감소하다가 89년에 다시 47ppb로 상승하였으며, 그 이후 계속 감소하는 추세를 보이고 있으나(환경청, 1994), WHO 권고치인 15~23ppb를 초과하고 있다(WHO, 1987).

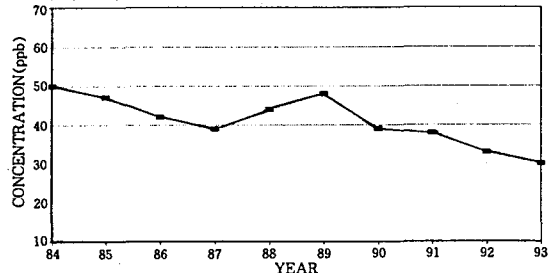


Fig. 2. Annual mean variation of SO₂ concentration in Pusan, 1984~1993.

그리고 1990년부터 1993년까지 4년간 월별 SO₂ 농도를 덕천동(주거 지역), 광복동(상업 지역) 그리고 감전동(공업 지역)으로 나누어 그림 3에 나타내었다. 최대값이 나타난 달은 겨울철인 12월부터 1월까지이고 최소값을 나타낸 달은 여름철인 7, 8월이며, 덕천동의 경우 1991년 4월에 최대를 나타내는 예외가 있기도 하였다. 겨울철에 공업 지역인 감전동이 주거 지역인 덕천동보다 2배 이상의 농도를 나타내었다.

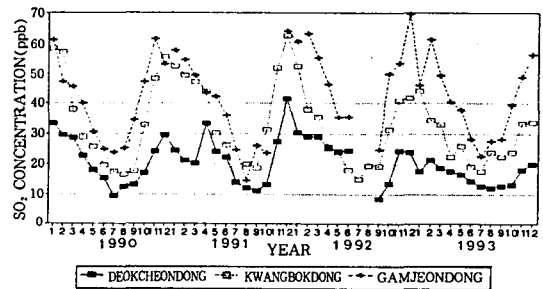


Fig. 3. Monthly mean values of daily SO₂ concentration in ppb at three stations(Kwangbokdong, Gamjeondong, Deokcheondong) in Pusan.

세 지역에서의 계절별 SO₂ 농도의 일변화를 그림 4에 나타내었다. 4계절 모두 이른 아침에 최고 농

도가 나타나고 일몰후에도 peak를 나타내고 있다. 이른 아침의 peak는 Rush hour의 자동차에 의한 배출량 증가와 지표의 야간 복사 냉각에 의해 형성된 역전층의 영향으로 대기층이 안정하여 확산이 억제되기 때문이며, 10시 이후의 농도 감소는 기온 상승에 의한 대기의 불안정과 풍속의 증가가 중요한 원인이 되어 대류에 의한 확산 현상이 잘 일어나 오염 물질이 희석되기 때문이라 생각된다. 특히 광복동의 겨울철과 봄철에 뚜렷한 double peak(DP)를 나타내고 있으며, 전반적으로 여름철 오후의 농도 변화는 거의 없으며, 덕천동의 경우는 4계절 모두 오후와 야간의 농도는 거의 일정한 상태를 나타내어 다른 지역과는 특이한 모습을 보여 주었다.

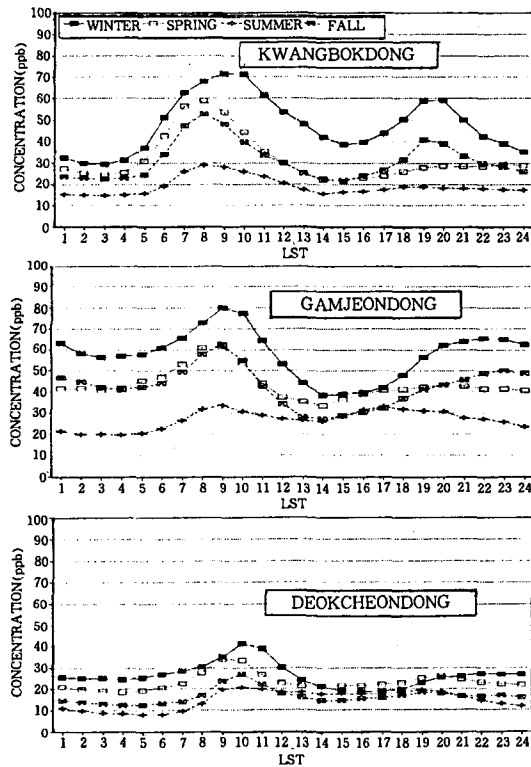


Fig. 4. Diurnal variation of daily SO₂ concentration in ppb (spring, summer, fall, winter) at three stations (Kwangbokdong, Gamjeondong, Deokcheondong) in Pusan.

일최고값을 나타내는 시각이 동계를 제외하고 광복동이 8시, 감전동이 9시 그리고 덕천동이 10시로 1시간씩 지연되고 있는 것을 보여 주고 있다. 이러한 원인으로 오전의 오염 농도 peak는 접지 역전층 속의 낮은 오염원으로부터 발생한 오염 물질이 폐

쇄되고 또 그 역전층이 해소될 때, 높은 오염원으로 부터 발생한 오염 물질이 지표로 내려오는 현상 때문이라고 본다면(Ku et al. 1987; 河村, 1979), 해안에 위치한 지역부터 먼저 최고 농도에 달하고 점차로 내륙으로 갈수록 최고 농도가 되는 시각이 늦어진다는 생각과 또 다른 이유로는 해안 지역에서 발생하는 해풍에 의해서 오염 물질이 내륙으로 수송되어 최대 농도 발생 시각이 내륙으로 갈수록 지연된다는 생각을 할 수 있다(千葉等, 1990; 原田, 1969; 阿部와 楠田, 1982; Luria et al., 1984).

광복동은 2차 peak가 여름을 제외하고 뚜렷하게 20시경에 나타나나, 감전동은 2차 peak가 계절마다 다른 시간에서 나타나고 있다. 그리고 덕천동과 감전동에서는 오후 시간에 하계의 농도가 추계보다 높은 값을 나타내기도 하였다.

표 1에서는 1993년 1년 동안의 부산 지역 7개 지점의 SO₂ 평균 농도의 지역별 상관 관계를 구해 보았다. 먼저, 가장 높은 농도를 보인 지역은 공단 지역인 감전동(39.93ppb)이었고 가장 낮은 지역은 주거 지역인 덕천동(16.36ppb)으로 지역적 차이가 크게 나타났다. 각 지역간의 SO₂ 농도의 상관 관계를 살펴보면, 공단 지역이 아닌 명륜동과 범천동 사이의 상관계수가 0.86으로 가장 높았고, 공단 지역의 신평동과 주거지역인 대연동이 0.53으로 가장 낮은 상관 계수를 나타내었다. 특히 신평동은 다른 지역과 낮은 상관 관계(광복동: 0.60, 명륜동: 0.57, 대연동: 0.53, 덕천동: 0.59)를 나타내었다.

4. 부산지역의 SO₂ 고농도일의 특성

가. SO₂ 고농도일의 선정과 기상 인자와의 관계

부산 지역에서 SO₂ 고농도일을 조사하기 위해 7개 지역의 대기 오염 자동 측정망 중에서 가장 농도가 높은 감전동을 선정해서 조사하였다.

SO₂ 고농도일을 선정하는 조건은 지역마다 다른 조건을 취하고 있다(강인구, 1989; 市川清見, 1972; Lalas et al., 1982). 본 연구에서는 SO₂ 농도가 95ppb 이상인 날을 고농도 발생일이라 선정하여, 1990년부터 1993년까지 4년간 감전동에서 SO₂ 고농도일을 조사해 본 결과, 표 2와 같이 11월부터 2월에 걸친 겨울철에 대부분 발생하였고, 90년 7회, 91년 22회, 92년 7회 그리고 93년 6회로서 총 42회가 발생하였다.

고농도가 발생할 때의 기상 조건을 고찰하기 위해서 부산 지방 기상청에서의 1961년부터 1990년까지 30년간 평균 기상 자료와 고농도가 발생했을 때의 기상 자료를 표 3과 같이 비교해 보았다.

Table 1. Correlations of daily SO₂ values measured at the various air quality continuous monitoring stations in Pusan for 1993. The values on the diagonal are the mean SO₂ concentrations in ppb and those in parentheses are the standard deviations for each station. Below the diagonal, underlined, are the numbers of pairs utilized for the various correlations.

	Kwangbok	Beomcheon	Meongryun	Daeyeon	Sinpyeong	Gamjeon	Deokcheon
Kwangbok	28.25 (12.81)	0.79	0.78	0.77	0.60	0.64	0.62
Beomcheon	<u>342</u>	22.45 (13.16)	0.86	0.79	0.72	0.78	0.73
Meongryun	<u>344</u>	<u>350</u>	26.61 (16.71)	0.79	0.57	0.80	0.77
Daeyeon	<u>300</u>	<u>307</u>	305	30.84 (15.68)	0.53	0.65	0.64
Sinpyeong	<u>326</u>	<u>333</u>	<u>330</u>	<u>290</u>	29.13 (15.18)	0.72	0.59
Gamjeon	<u>313</u>	<u>324</u>	<u>319</u>	<u>280</u>	<u>303</u>	39.93 (21.04)	0.65
Deokcheon	<u>341</u>	<u>347</u>	<u>348</u>	<u>302</u>	<u>328</u>	<u>315</u>	16.36 (8.5)

Table 2. Cases of high pollution concentration episodes(daily SO₂ concentration value higher than 95ppb) at Gamjeondong air quality monitoring station, 1990~1993.

DATA	SO ₂ CON. (ppb)	PRES- SURE (hPa)	REL. HUMI. (%)	WIND SPEED (m/s)	CLOUD AMO. (1/10)	DATA	SO ₂ CON. (ppb)	PRES- SURE (hPa)	REL. HUMI. (%)	WIND SPEED (m/s)	CLOUD AMO. (1/10)
90. 1. 8	110.8	1029.9	73	1.7	6.3	11.30	117.5	1016.4	52	3.3	0.5
1. 9	96.9	1021.8	83	1.6	9.0	12. 1	110.5	1018.3	50	2.3	2.0
1.18	108.5	1017.2	64	4.3	9.8	12. 2	100.5	1020.3	68	3.0	3.0
1.22	100.1	1025.0	43	4.8	4.8	12. 3	99.8	1020.5	51	3.1	0.5
2. 6	108.7	1029.3	69	2.1	10.0	12. 4	95.0	1024.1	27	2.1	0
11.13	98.8	1024.3	65	3.9	0	12. 5	122.0	1025.6	46	2.1	0
11.17	100.2	1025.2	75	1.7	0	12. 6	120.0	1025.0	36	2.0	2.3
91. 1.15	95	1028.1	44	3.7	0.5	12. 7	105.0	1023.7	64	3.0	1.8
1.16	124.7	1026.2	55	3.0	4.5	92. 1.25	107.6	1021.3	62	2.4	2.3
1.24	104	1019.8	81	2.5	7.5	2.15	110.7	1012.9	55	4.8	7.3
2. 7	128.3	1017.8	42	3.9	3.8	3.12	102.1	1022.0	48	3.7	1.5
2. 9	110.7	1021.5	68	2.2	7.5	12.12	100.1	1019.5	49	1.8	5.3
2.13	102.6	1025.4	63	2.4	7.5	12.18	106.0	1028.6	41	2.1	0
2.27	112.6	1023.9	72	3.4	7.3	12.19	128.9	1025.4	56	1.4	2.0
3. 4	99.0	1019.9	52	3.3	9.0	93 2. 3	119.8	1026.0	40	5.3	3.8
11.21	100.0	1026.9	45	3.4	0.0	2. 4	104.9	1022.5	46	3.4	0
11.22	104.5	1025.3	59	2.5	5.5	2. 5	112.1	1016.8	61	3.2	0.3
11.26	112.5	1031.3	48	2.1	7.0	3. 4	96.0	1020.6	54	4.0	0
11.27	116.6	1023.4	51	1.9	6.8	12. 8	95.0	1028.0	49	2.7	0.3
11.28	104.6	1016.3	67	2.6	5.0	12. 9	98.0	1027.1	59	1.5	3.0
11.29	130.5	1017.4	61	1.6	6.3	Average	107.8	1022.9	60.0	2.8	3.7

고농도가 발생했을 때의 해면 기압(1022.9hPa)과 상대습도(60.0%)가 평상시(1021.8hPa, 54.8%)보다 높았으나, 운량은 거의 영향이 없었다. 그리고, 고농도 발생일의 평균 풍속(2.8m/s)은 평상시(4.4m/s)보다 매우 낮았다. 즉 SO₂ 고농도 발생은 낮은 풍속, 고기압이 특징이라 할 수 있었다.

Table 3. Monthly variations of averaged meteorological factors during 30 years, 1961~1990 in Pusan.

MONTH	PRES-SURE (hPa)	REL. HUMI (%)	WIND SPEED (m/s)	CLOUD AMO. (1/10)
1	1022.0	51	4.5	3.3
2	1021.3	55	4.6	4.3
11	1021.6	54	4.1	3.7
12	1022.4	59	4.3	2.9
Average	1021.8	54.8	4.4	3.6

나. SO₂ 고농도 발생과 기압 배치

부산 지역에서 SO₂ 고농도일을 동반하는 유용한 종관 환경을 구별하기 위해서 위에서 선택된 42회의 SO₂ 고농도 발생일의 종관 조건을 일본 기상청 일기도를 이용하여 주의 깊게 관찰한 결과, 대부분

의 경우에 우리 나라는 이동성 고기압하에서 SO₂ 고농도가 발생하였으며, 이 기압계가 우리 나라를 통과한 뒤에 고농도가 소멸하는 형태를 취하고 있었다. SO₂ 고농도 발생일의 대표적인 사례인 1991년 11월 26일부터 12월 7일까지 12일간의 일기도를 그림 5에 나타내었다. 11월 26일 이동성 고기압이 동서로 위치하면서 고농도가 발생하였고, 11월 28일 기압골이 남동해에 걸쳐 있으나, 그 세력이 약해서 오염도를 낮추지 못했으며, 11월 29일은 130.5ppb의 최고 농도를 기록하기도 하였다. 계속해서 이동성 고기압 내지 고기압 연변부에서 대기가 안정하면서 높은 대기 오염 농도가 계속되었으며, 12월 4일부터 또 이동성 고기압이 남부 지방에 동서로 형성되면서 5일과 6일에 120ppb가 넘는 고농도가 발생하였다. 7일부터 일본 본토에서 남부 지방으로 이어지는 전선이 형성되면서 고농도는 사라지게 되었다.

따라서 SO₂ 고농도 발생일을 예측하는데 있어 기압 배치는 가장 기본적인 예측 인자라고 할 수 있을 만큼 큰 영향을 주는 것이라고 생각되며, 이러한 기압 배치하에서의 저층 대기의 연직 구조, 즉 접지 역전층과 상층 역전층의 유·무와 높이 등을 파악하면, SO₂ 고농도 발생을 예측하는 것이 더욱 쉬울 것이라고 생각된다.

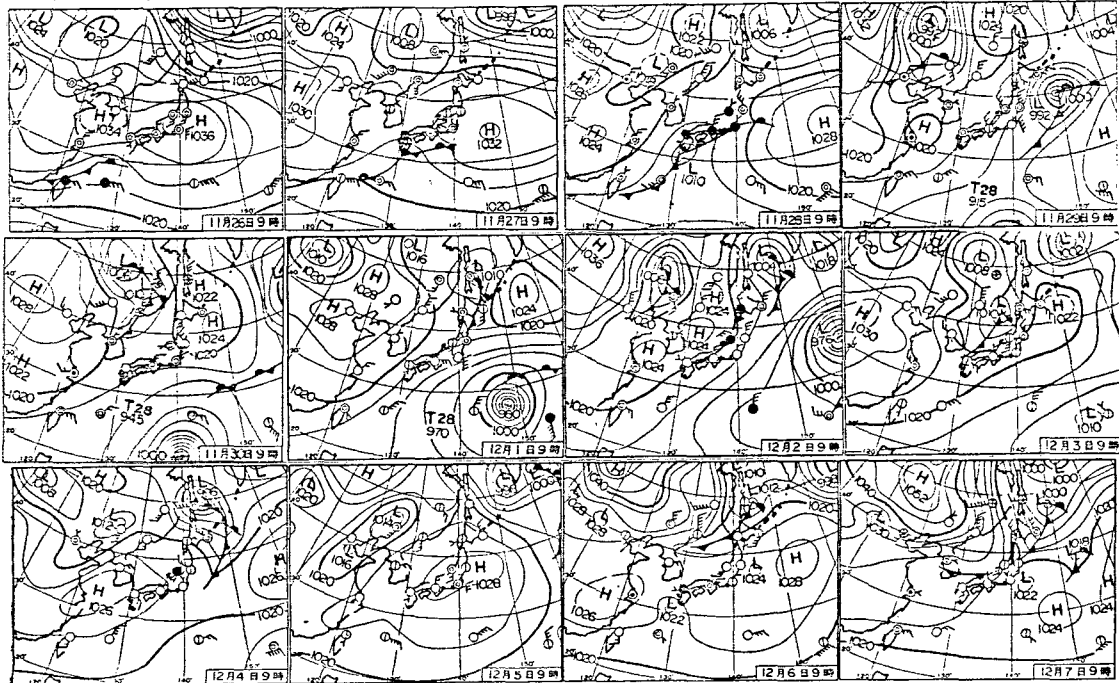


Fig. 5. Synoptic weather maps for cases of high pollution concentration episodes from 26, November, 1991 to 7, December, 1991 during 12 days.

다. SO₂ 고농도와 하층 대기의 안정성과의 관계
부산 지역의 SO₂ 고농도 발생일에 대한 특성을 보다 깊이 고찰하기 위해서 하층 대기의 안정도에 대해서 고찰해 보았다. 감전동과 가까운 김해 공군 기상대의 지상 기온을 이용하고, 상층 기온은 감전동에서 남동쪽으로 약 3km 정도 떨어진 해발 540m 인 구덕산 레이다 관측소의 기온을 이용하여 기온의 연직 분포의 시간별 변화를 표 4와 같이 살펴 보았다.

SO₂ 고농도 발생일 42일 중에서 유용한 관측 자료가 있는 27일을 선택해 조사해 본 결과, 기온 역전 현상이 고농도 발생 전날의 24시(김해기상대와 구덕산레이다 관측소의 기온차: -1.72°C)부터 발생하기 시작하여 6시(-3.51°C)에 가장 강한 역전을 보였고 9시에 약해지기 시작하여 12시에는 완전히 사라졌다. SO₂ 고농도가 발생하는 날은 새벽부터 대기가 안정하였다는 것을 명확하게 보여주며, 대기 오염 농도 예보에 있어 하층 대기의 안정성도 반드시 고려해야 할 예보 인자라고 할 수 있으며, 위에서 언급한 저층 대기의 역전층과 관련시키면 더 좋은 결과를 얻을 수 있으리라 사료된다.

Table 4. Mean temperature difference(°C) and temperature lapse rate(°C/100m) between Kimhae air force meteorological station(6m) and Mt. Gudeok radar observatory station(540m) for the episode days(27 cases), 1991~1993.

	15h	18h	21h	24h	03h	06h	09h	12h
$\Delta T_{KIM-GUD}$	4.88	3.35	0.07	-1.72	-2.79	-3.51	-2.41	2.42
γ (lapse rate)	0.91	0.63	0.01	-0.32	-0.52	-0.66	-0.45	0.45

5. 결 론

1990년 1월 1일부터 1993년 12월 31일까지 부산 지역의 7개 대기 오염 자동 측정망의 시간별 자료를 이용해 부산 지역의 SO₂농도 특성과 기상 인자와의 관계와 고농도일 발생의 특성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

부산 지역의 SO₂농도는 매년 감소 추세에 있으며, 겨울철에 최대 농도, 여름철에 최소 농도를 나타내었다. 해안에서 내륙으로 갈수록 peak를 나타내는 시각이 지연되는 양상을 보였고, 지역별 SO₂농도의 상관 관계는 명륜동과 범천동이 가장 높고 신평동과 대연동이 가장 낮았다.

특히 부산 지역에서 95ppb가 넘는 SO₂ 고농도 발생일은 겨울철이 대부분이었으며, 평상시보다 낮

은 풍속, 높은 기압이 있는 날에 많이 발생하였고, 종관기상학적으로 이동성 고기압이 우리 나라를 덮고 있을 때와 하층 대기가 안정할 때 고농도의 발생이 더욱 용이하였다.

감사의 글

본 연구를 위해 자료를 제공해 주신 환경처 대기정책과와 자료분석에 도움을 준 부산대학교 대기과학과 방종선에게 감사를 표합니다.

참 고 문 헌

강인구 등(1989) 도시지역 대기질 개선에 관한 연구(I), 국립환경연구원보, 11, 81-96.
박재립(1975) 부산시의 대기오염과 측정망(감시망)에 관한 고찰, 한국환경위생학회지, 2(1), 37-48.
박종길(1993) 부산지방의 대기오염에 미치는 기상 인자에 관한 연구, 부산시정연구보고, 5, 313-334.
하수호 등(1993) 부산시 대기오염물질간의 상관도에 관한 연구, 부산대학교 환경연구보, 11, 3-13.
전병일, 김유근, 이화운(1994) 해풍이 부산 지역의 대기오염 농도에 미치는 영향, 한국환경과학회지, 3(4)(인쇄중).
환경청(1994) 환경백서, 455pp.
市川清見(1972) 大氣汚染豫報の基礎調査, 天氣, 19(11), 33-37).
阿部信男, 楠田 信(1982) 大分市における海陸風と二酸化硫黄濃度の關係, 天氣, 29(1), 87-90.
原田 郎(1969) 大板における夏の亞硫酸カス汚染の氣象學的解析例, 研究時報, 21, 37-40.
千葉 修 等(1990) 接地氣層での海風前線の觀測, 天氣, 39-43.
河村 武(1979) 都市の大氣環境, 東京大學出版會, 178pp.
Lalas, D. P., V. R. Veirs, G. Karras and G. Kallos (1982) An analysis of the SO₂ concentration levels in Athens, Greece, Atmos. Env., 16(3), 531-544.
Luria M, Almog H. and Peleg M.(1984) Transport and transformation of air pollutants from Israel's coastal area, Atmos. Env., 18, 2215-2222.
Ku, J. Y., S. T. Rao, and K. S. Rao(1987) Numeri-

- cal simulation of air pollution in urban areas
: model performance, Atmos. Env., 21, 213-
232.
- Seinfeld, J. H.(1985) Atmospheric chemistry and
physics of air pollution, John Wiley & Sons,
738pp.
- WHO(1987), Air quality guidelines for Europe,
WHO Regional Publications, European Se-
ries, No. 23, Copenhagen.