

석유화학 공단 주변지역 SO₂의 계절별 변화 예측

서성규 · 이선원 · 이상득* · 박종혁**

여수대학교 건설·환경공학부

*목포대학교 환경공학과

**전남대학교 환경연구소

Prediction of Seasonal SO₂ Concentration in Petroleum Industrial Complex Area

Seong-Gyu Seo · Sun-Won Lee · Sang-Deug Lee* · Jong-Hyuk Park**

Division of Civil and Environmental Engineering, Yosu National University

**Department of Environmental Engineering, Mokpo National University*

***Environmental Research center, Chonnam National University*

ABSTRACT

This study focuses on the assessment of long-term SO₂ concentration around the Yochon industrial complex area using ISCLT model. ISCLT model has been officially authorized by the U.S. EPA. Yochon industrial complex was located around Kwang-yang bay. In order to simulate the prediction of long-term SO₂ concentration by ISCLT model and the application in Yochon industrial complex area, every point source was identified and applicability to this region was studied in detail. Long-term meteorological data were analyzed from 1995 to 1998. As the result of verification and calibration for the model accuracy, the conversion factor was 8.35. According to the analysis from 1995 to 1998 meteorological data in Yochon, west north west(WNW: 13), north east north(NEN: 1), and south(S: 8) directions were identified to be the most frequently occurred one with its frequency. As the result of modeling prediction, SO₂ concentration in Yochon petroleum industrial complex area was satisfied to Air Quality Standards.

Key Words : ISCLT Model, SO₂, Petroleum Industrial Complex, Seasonal Variation, Prediction

1. 서 론

일반적으로 대기오염은 공기 중에 정상적으로 존재하지 않는 물질을 대기로 방출시키는 경우를 말한다. 대기 오염물질은 생성과정에 따라 크게 1차 오염물질(primary pollutant)과 2차 오염물질(secondary pollutant)로 분류한다. 1차 오염물질은 발생원에서 직접 대기로 방출되는 오염물질로서 SO_x , NO_x , CO 등이 있으며, 2차 오염물질은 1차 오염물질들의 대기 중 화학반응에 의해 생성되는 유해물질이다.

석유화학단지는 대규모의 에너지를 소비하는 장치산업이며, B-C계열 연료의 사용으로 인하여 대량의 1차 오염물질을 발생시킨다. 현재 여천산단 등 대규모의 공단이 입주한 지역의 경우 청정연료 사용의 의무화와 저유황유의 사용¹⁾에 따라 배출량이 크게 줄고 있지만, 막대한 연료의 사용으로 인해 여전히 SO_2 배출량이 크다는 문제점을 가지고 있다. 현재 여천산단에서 발생하는 오염물질 중 SO_2 는 1998년 연간 배출량이 21,060,202kg으로 가장 많았다.²⁾ 대기 중에 배출되는 SO_2 는 주로 연료에 함유된 황 성분에 의하여 발생하며, 우리나라 주요도시의 SO_2 오염도는 1990년 이전까지는 연간 환경기준치 30ppb를 초과하였으나, 저유황유 공급 및 청정연료 사용 의무화로 1990년 이후부터는 감소하는 추세를 나타내고 있다. 그러나 울산과 같은 석유화학단지에서는 특별한 경향은 보이지 않으며,³⁾ 여천산단의 경우는 경향을 파악할 수 있는 지속적인 연구결과가 없는 실정이다. 종합적인 대기 관리 정책을 수립하기 위해서는 배출되는 SO_2 양 뿐만 아니라, 대기중의 SO_2 농도에 대한 지속적인 monitoring이 요구된다.

대기 오염물질의 확산예측에는 여러 model들이 적용되고 있지만, 일반적으로 사용하는 model은 U.S. EPA에서 제공하는 ISCLT(Industrial Source Complex Long Term), ISCST(Industrial Source Complex Short Term), CDM(Climatological Dispersion Model) 및 MPTR(Multiple Point-source, TERRain-sensitive)모델 등이 대표적이다.⁴⁾ ISC계열의 모델은 산업오염원이 복합된 산업단지에서의 장·단기 예측 모델로 정상상태의 Gaussian plume 모델이며,⁵⁾ ISCLT 모델은 CRSTER 모델을 기초로하여 개발되었다. 이 모델들은 지면에서의 계절평균이나 연평균 농도와 다중 연속점, 체적, 면적 및 선 오염원으로부터 총 침착량을 계산할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 U.S. EPA의 공인 모델 중 ISCLT 모델을 이용하여 여천산단 주변지역의 계절별 SO_2 농도 변화를 예측하여 대기질 관리에 중요한 기초 data를 제공하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 이론적 배경^{3,5,6)}

대기오염물의 distribution은 그 오염물의 물리·화학적 특성, 주위환경의 기상학적 특성, 공기의 이동에 방해되는 장애물의 위치와 관련한 stack 위치, 그리고 stack 하류지역의 지형 특성 등 여러 가지 요소에 의하여 좌우된다. 일반적인 예측모델로는 Gaussian distribution 식을 응용한 모델이 많이 사용되고 있다. 일정한 한 점에서 발생하는 오염물질이 안정한 상태에서 확산되는 상태를 Fig. 1에 나타내었다. 일정한 배출물질이 y 방향과 z 방향으로 각각 확산 폭 σ_y 와 σ_z 를 가지고 확산된다면, 풍하거리 x 에 있어서 농도 분포는 다음 식과 같다.

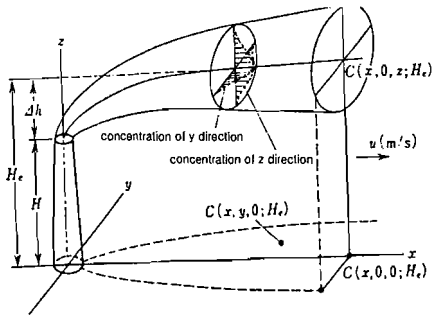


Fig. 1. Distribution of plume in a wind-oriented coordinate system(i.e., x along the direction of $\bar{u}$): an elevated source location at $(0, 0, H_e)$.

$$C(x, y, z) = C_a(x, 0, 0)F(x, y, z) \\ = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad \dots\dots\dots 1)$$

여기서,

C_a : 풍하방향의 임의의 점 x 에서 지면의 농도

$F(x, y, z)$: 공간좌표상의 확률적 분포

1) 식은 무한 공간 중에서 원점(0, 0, 0)에 발생원이 존재할 때 x 축을 평균류 u 의 방향으로 취한 경우, 임의의 위치에서의 농도를 구하는 식이다. 실제로는 무한 공간이 아니고, 지표면과 같은 경계가 존재하고 있는 반 무한 공간이 더 중요하다. 일반적으로 많은 물질의 질량속(mass flux)은 지표면과 같은 고체의 경계에서는 0이다. 이와 같은 영향을 고려하여 stack의 유효 높이(H_e)에서 배출되는 Q (g/s 또는 m³/s)에 대한 임의점 (x, y, z) 에서 농도는 다음 식으로 나타내게 된다.

$$C(x, y, z; H_e) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \times \\ \left[\exp\left\{-\frac{(z-H_e)^2}{2\sigma_z^2}\right\} + \exp\left\{-\frac{(z+H_e)^2}{2\sigma_z^2}\right\} \right] \quad \dots\dots\dots 2)$$

여기서, Q : 배출량(g/s 또는 m³/s)

u : x 축의 풍속

H_e : stack의 유효 높이

σ_y : y 축 확산계수

σ_z : z 축 확산계수

ISCLT 모델의 경우 stack의 유효 높이(H_e)는 Briggs⁷⁾의 연기상승식을 따른다.

불안정하거나 중립상태의 buoyancy에 의한 상승 높이는

$$F_b < 55 \text{ 일때, } H_e = H_s + 21.425 \frac{F_b^{3/4}}{u_s} \quad \dots\dots 3)$$

$$F_b \geq 55 \text{ 일때, } H_e = H_s + 38.71 \frac{F_b^{3/5}}{u_s} \quad \dots\dots 4)$$

이고, momentum에 의한 상승은,

$$H_e = H_s + 3 d_s \frac{v_s}{u_s} \quad \dots\dots\dots 5)$$

이다.

여기서, H_s : stack의 물리적 높이

u_s : stack상에서의 풍속

v_s : stack 배출가스 속도

안정한 상태에서 buoyancy에 의한 상승은

$$H_e = H_s + 2.6 \left[\frac{F_b}{u_s \sqrt{s}} \right]^{1/3} \quad \dots\dots\dots 6)$$

momentum에 의한 상승은

$$H_e = H_s + 1.5 \left[\frac{F_m}{u_s \sqrt{s}} \right]^{1/3} \quad \dots\dots\dots 7)$$

이다. 여기서, s 는 stability parameter로 다음 식에 의해 계산되어 진다.

$$s = g \frac{\partial \theta / \partial z}{T_a} \quad \dots\dots\dots 8)$$

여기서, $\partial\theta/\partial z$ 는 단위 고도에 따른 온도의 변화량을 표시한다. 대략적으로 안정도 E에서는 $0.020^\circ\text{K}/\text{m}$ 이고 안정도 F에서는 $0.035^\circ\text{K}/\text{m}$ 의 값을 가진다.

x 방향의 거리가 최후 상승 거리보다 적은 상태에서는 다음과 같다.

$$H_e = H_s + 1.60 \left[\frac{F_b^{1/3} x^{2/3}}{u_s} \right] \dots\dots\dots 9)$$

이다.

F_b 는 buoyancy flux parameter로 다음식으로 산출한다.

$$F_b = g v_s d_s^2 \left[\frac{\Delta T}{4 T_s} \right] \dots\dots\dots 10)$$

여기서, $\Delta T = T_s + T_a$ 로, T_s 는 stack에서 배출 가스 온도($^\circ\text{K}$), T_a 는 대기온도($^\circ\text{K}$)이다.

v_s = 배출가스의 속도, d_s 는 stack의 직경이다.
momentum flux parameter F_m 은

$$F_m = v_s^2 d_s^2 \frac{T_a}{4 T_s} \dots\dots\dots 11)$$

2.2 Data 입력

Gaussian 모델의 수평·수직적 확산은 풍향, 풍속, 대기안정도에 의해서 결정되므로, 기상 data의 입력이 중요하다. 본 연구에서는 중앙 기상청의 협조를 얻어 '95. 1. 1~'98. 12. 31까지의 풍향, 풍속, 온도, 일사량의 data를 이용하였다. 풍향풍속을 고려하고, Pasquill-Gifford 공식을 이용하여 대기안정도를 평가하였다.⁸⁾

오염원 data는 석유화학공단 입주 업체 중 1, 2, 3종 이상의 대기배출업을 선정하여 Stack규격(높이, 배출속도, 배출온도, 배출량, 직경, 지면고도)을 조사하여 입력하였다. 배출원의 연료사용량은 EPA와 환경부의 배출계수^{9,10)}를 이용하였으며, 산출 결과를 Table 1에 정리하였다.

Table 1. Emission amount of SO₂ in Yochon petroleum industrial complex.

No.	SO ₂ emission amount(kg)	No.	SO ₂ emission amount(kg)
1	59.84	17	744,531.97
2	853.14	18	189,489.66
3	895,459.06	19	119,634.13
4	45,852.17	20	2,481,767.47
5	566.20	21	6,582.93
6	74,860.30	22	47,743.67
7	854,004.41	23	2,840.82
8	61,851.59	24	264,975.93
9	1,777.05	25	32,288.87
10	111,765.60	26	2,020,111.17
11	237,230.01	27	118,544.87
12	27,930.76	28	42,108.52
13	92,006.17	29	692,838.56
14	33,270.26	30	73,739.95
15	4,682.88	31	29,611.23
16	1,126.51	32	27,131.26

2.3 격자의 선정

예측지역의 격자는 기준점(TM 250, 141)으로부터 $29 \times 22(1\text{km 간격})$ 로 선정하였으며, 전체적으로 여천산단을 중심으로 여수, 남해, 광양 및 여천까지의 오염물질의 영향을 파악할 수 있도록 하였다. 배출원으로 67개의 stack을 표시하였으며, 각 격자에서 부락이 형성되어 있는 12개 지점의 예측점을 선정하여, SO₂ 영향을 예측하고자 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 기상 분포

Gaussian 모델의 경우 x 를 풍향으로 고정시키거나 풍향의 관측 분해도를 이용하여 결정한다. 여기에 풍속과 일사량 등을 이용하여 Pasquill-Gifford의 안정도를 구하고 $17 \times 6 \times 6$ 의 발생빈도의 배열을

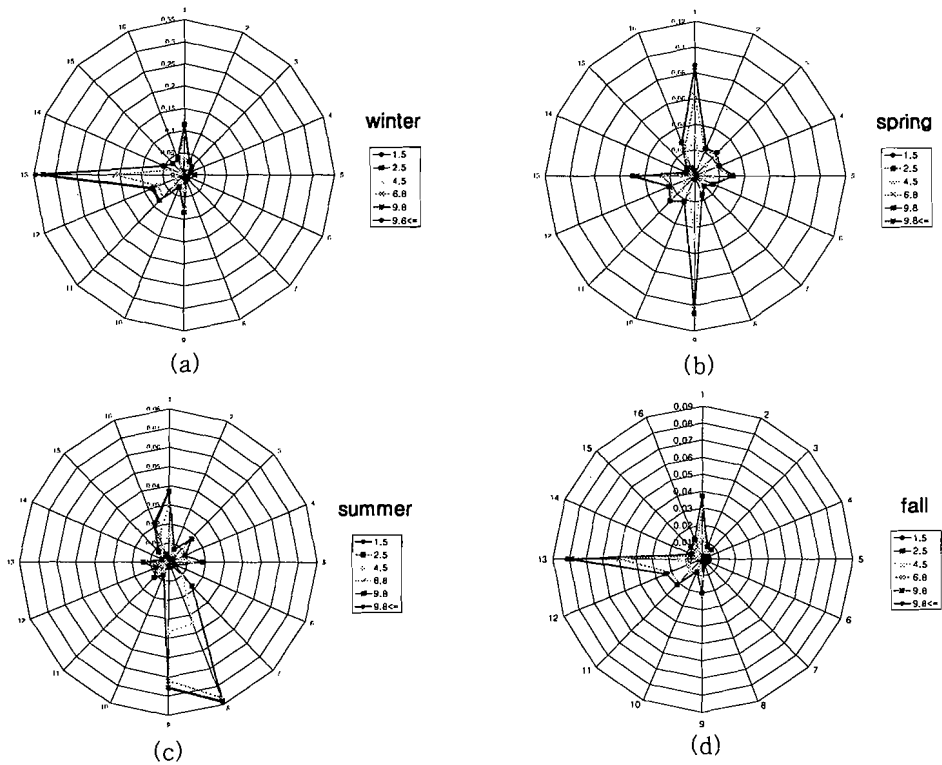


Fig. 2. Windrose of Yochon industrial petroleum complex area from 1995 to 1998.
(a) winter (b) spring (c) summer (d) fall

구하여 입력한다.¹¹⁾ 1995~1998년의 계절별 windrose 분석 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 분석 결과를 보면, 겨울에는 서북서(WNW)풍이 가장 많은 발생 빈도를 보였으며 주풍속은 4.5~6.8m/s의 풍속이 가장 많이 발생하였다. 봄에는 북서북(NWN)풍과 남서남(SWS)풍이 거의 같은 발생분포를 보이고 있으며 주풍속은 4.5~6.8m/s 범위가 많이 발생하였다. 여름의 경우는 남(S)풍과 남서남(SWS)풍이 가장 많은 발생빈도를 보였다. 주풍속은 남서남(SWS)풍의 경우 2.5~6.8m/s 범위를 보였다. 가을의 경우 전체적인 경향은 겨울과 비슷하지만 전체적인 발생 빈도는 겨울에 비해 절반의 수준을 보이고 있다.

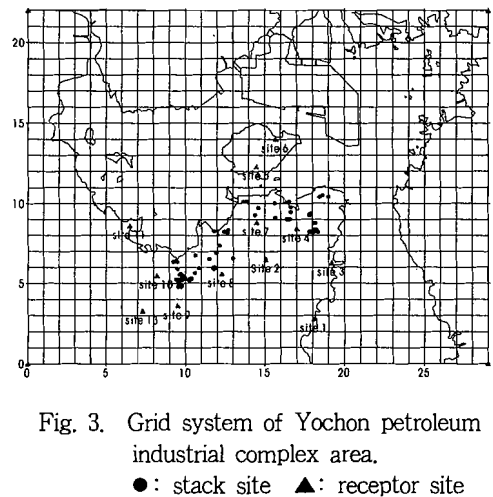


Fig. 3. Grid system of Yochon petroleum industrial complex area.

●: stack site ▲: receptor site

3.2 안정도 분포

대기 안정도(stability)는 오염물질의 풍하측 확산에 중요한 요소로 일사량, 운량 및 풍속 자료를 이용하여 산출하며, 매 시간대별 안정도는 풍속과 일사량을 등급별로 분류하여 Pasquill-Gifford 안정도 분류기준에 따라 판정하였다. 등급별 안정도는 F는 매우 안정, D, E 등급은 안정, C 등급은 중립, A, B 등급은 불안정한 상태이다. 기본 확산 parameter 인 대기 안정도를 검토하기 위하여 주간에는 일사량과 풍속, 야간에는 풍속만으로 결정한 결과를 Table 2에 정리하였다.

여수지역 대기 안정도의 산출 결과를 보면, 매우 안정한 상태인 F는 거의 나타나지 않았으며, A 등급의 불안정한 대기상태 빈도가 높았다. 위 결과를 종합해 볼 때 여천산단 주변의 대기상태는 확산이 잘되는 불안정한 상태가 많은 것으로 나타났다.

Table 2. Stability of Yochon industrial petroleum complex area from 1995 to 1998.

Season	Stability(%)					
	F	E	D	C	B	A
Winter	1.249	5.619	5.215	19.122	5.752	17.953
Spring	0.938	4.673	2.980	3.298	2.758	5.984
Summer	1.610	3.285	1.618	1.244	3.037	2.883
Fall	0.953	1.836	1.263	1.624	2.534	2.572
Sum	4.750	15.413	11.076	25.288	14.081	29.392

3.3 모델의 보정

일반적인 Gaussian model은 주로 평지에 적용¹²⁾되므로, 지형의 data를 고려하지 않을 경우 정확한 예측이 어렵다. 한편 모델의 보정방법으로 확산 계수를 도입하여 모델의 신뢰도를 제고하고자 한다.¹³⁾ 모델의 보정식은 다음과 같다.

$$f = \frac{C}{x} \dots\dots\dots 12)$$

여기서,

C: 대기 자동 측정망 지점별 SO₂의 실측농도

x: 모델링에 의한 SO₂의 지표면 예측농도

f: 환산계수

ISCLT 모델의 자체조건에 의해 나타난 수치와 분석 data를 서로 비교하여 나타난 환산계수는 측정값과 모델의 예측 값을 비교하여 환산계수(f)를 구하였으며, 그 값은 8.35였다. 기존의 연구에 의하면 울산지역의 환산계수는 1/12의 결과를 보였으며, 본 연구에서는 모델의 농도가 상당히 저 농도로 예측된 것을 알 수 있다.¹³⁾ 이는 울산지역과 여천산단 지역의 기상조건, 지형 및 외부로부터의 오염물질 유입 등이 다르기 때문으로 판단된다.

3.4 SO₂ 농도 분포

환산계수를 고려하여 모델을 수행한 결과, 계절별 오염물질의 분포를 살펴보면 겨울의 경우 배출원 주변의 농도가 다른 계절보다 높은 것으로 나타났다. 이는 계절적으로 지표면의 온도가 낮아 대기 안정도가 안정한 상태로 유지되기 때문에 확산이 적게 일어난 결과로 판단된다. 여름의 경우 안정도가 불안정한 상태를 유지함으로 인해 대기의 확산이 잘되고 전체적으로 낮은 농도의 결과를 보이고 있다. 봄과 가을의 농도 분포는 겨울과 여름의 중간 상태를 보이는 것으로 나타났다. 전체적인 모델의 수행결과 예측된 SO₂의 농도는 대기 환경기준에 적합한 것으로 예측되었다.

계절별 농도 분포를 보면 겨울에는 다른 계절에 비하여 고농도로 예측되었다. 기상 분석 data와 비교해 보면, 겨울철은 전체적으로 풍속 및 기온이 낮아 혼합고의 높이가 다른 계절에 비해 낮으므로, 안정도 E가 상대적으로 다른 계절보다 많이 나타나는 것으로 조사되었다. 봄·여름의 경우는 전체적으로 농도 분포가 비슷하며, 기상 분석 data와 비교해 보면 전체적으로 풍속이 빠르고, 불안정한

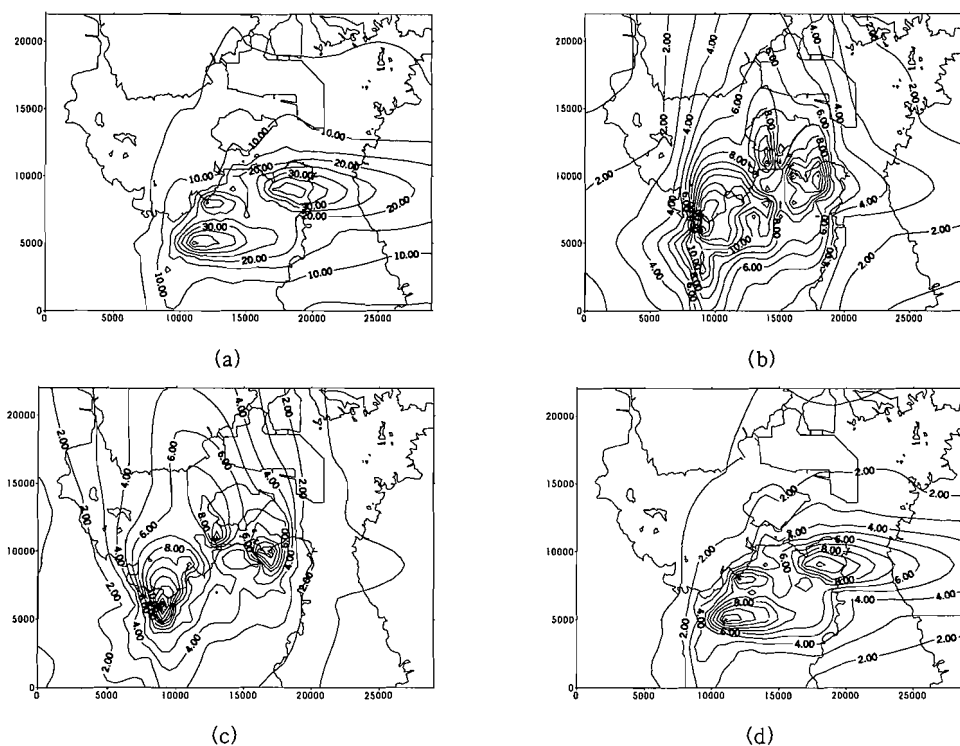


Fig. 4. Distribution of SO₂(ppb) by ISCLT model.
(a) winter (b) spring (c) summer (d) fall

Table 3. SO₂ concentration of receptor site in 1999.

Site	System		Model concentration(ppm)			
	X	Y	winter	spring	summer	fall
Site 1	23700	3800	0.011	0.002	0.002	0.003
Site 2	21500	6500	0.017	0.003	0.003	0.006
Site 3	25200	12200	0.012	0.003	0.002	0.005
Site 4	22000	9000	0.034	0.005	0.005	0.006
Site 5	19600	13800	0.010	0.004	0.006	0.003
Site 6	20700	15000	0.008	0.003	0.005	0.002
Site 7	19900	9840	0.033	0.006	0.004	0.004
Site 8	17300	7100	0.027	0.011	0.005	0.005
Site 9	15400	6200	0.025	0.007	0.008	0.006
Site 10	13300	6600	0.025	0.010	0.007	0.002
Site 11	11000	9700	0.011	0.012	0.005	0.001
Site 12	14400	3800	0.022	0.007	0.004	0.002

기상이 많이 나타나는 것으로 조사되었다.

지역별로 인구가 밀집되어 있는 12개 지역의 SO₂ 농도 결과를 Table 3에 나타내었다. 전체적으로 환경 기준치 미만의 결과를 보이고 있으며, 겨울에는 4와 7번 site에서 연간 대기 환경 기준치인 30ppb를 초과하는 것으로 예측되었지만, 봄, 여름, 가을의 계절에는 전체지역의 농도가 연간 대기 환경 기준치 미만으로 예측되었다. 이는 4와 7번 site가 대규모 배출원이 밀집되어 있는 지역에 위치하고 있기 때문으로 해석된다.

4. 결 론

여천산업단지에서 배출되는 SO₂를 U.S. EPA의 공인모델인 ISCLT를 이용하여 농도를 예측한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 모델을 수행하기 위하여 기상 data를 분석한 결과 여천 산업단지의 기상상태는 불안정한 상태의 발생빈도가 높았다.
2. 여천산단의 주풍향은 겨울철에는 서북서(NWN), 여름철에는 남(S), 남서남(SWS)풍 방향으로 4.5~6.8m/s의 바람의 발생빈도가 높은 것으로 나타났다.
3. 대상지역 범위내의 격자점에서 예측된 SO₂ 농도를 보면, 겨울에는 8.76~62.38ppb, 봄에는 9.81~38.17ppb, 여름에는 5.23~19.86ppb, 가을에는 1.60~16.01ppb의 농도범위로 예측되었다.
4. 현장 조사를 실시한 12개 site의 SO₂ 예측결과, 대부분 연간 대기 환경 기준치 미만으로 나타났다지만, 겨울철 4 및 7번 site에서 34, 33ppb로 예측되어 연간 대기 환경 기준치를 약간 초과하는 것으로 예측되었다.
5. 여천산단 주변지역의 SO₂ 확산 형태를 보면, 전체적으로 반경 5km 이내 지역에 영향을 미치고 여천시내, 광양, 여주시 및 남해에 대한 영향은

미약한 것으로 판단되어 진다.

참 고 문 헌

- 1) 환경부, 환경부 고시 제99-100호, 청정연료 등의 사용에 관한 고시(1999).
- 2) 전남대학교 환경연구소, '98 여천공업단지 대기 오염 영향평가, 전남대학교, 17~26(1999).
- 3) 조광명, 대기오염, 3판, 청문각, 18~19(1999).
- 4) Paolo Zannetti, Air Pollution Modeling, VNR, 95~105, 141~165, 355~421(1990).
- 5) Joe R. Eagleman, Air Pollution Meteorology, Trimedia, 85~91(1991).
- 6) Serjak, E. Tamsin and Matthias Ruth, A Dynamic Adaption of the Gaussian Dispersion Equation, Air & Waste Management, 89th Annual Meeting & Exhibition, 96-TA24A.03 (1996).
- 7) Briggs, G. A., "Discussion on Chimney Plumes in Neutral and Stable Surroundings", Atmos. Environ., 6, 507~501(1972).
- 8) 유인석, ISC3 모델을 이용한 대전 공단지역의 대기질 평가, 충남대학교, 6~10(1997).
- 9) OAQPS, Compilation of Air Pollution Emission Factor(AP 42): Volume I Stationary Point and Area Source, 5Ed., U.S. EPA, chapter 5, 6(1999).
- 10) 환경부, 환경부고시 제98-63호(1998).
- 11) OAQPS, User's Guide for the Industrial Source Complex(ISC3) Dispersion Model Volume I-User Instruction, U.S. EPA(1995).
- 12) Lee, K. J., A Study on the Effect of Simple Terrain on the Atmospheric Dispersion of Radionuclides, KIST, 6~23(1995).
- 13) 송덕만, 최창정, "울산-온산 공단 배출가스의 대기오염 예측을 위한 분산 모델링", 대한환경 공학회, 제18권, 10호, 1217~1226(1996).