

보령화력 지역의 복잡지형이 대기확산 모델링에 미치는 영향 비교

Comparison of Complex Terrain Effects in the Air Dispersion Modeling at the Poryong Power Plant Site

오현선 · 김영성 · 김진영 · 문길주 · 홍욱희¹⁾

한국과학기술연구원 지구환경연구센터

¹⁾전력연구원 에너지환경고등연구소

(1997년 7월 23일 접수, 1998년 2월 2일 채택)

Hyun Sun Oh, Young Sung Ghim, Jin Young Kim, Kil Choo Moon, Wuk Hee Hong¹⁾

Global Environment Research Center, Korea Institute of Science and Technology

¹⁾*Center for Advanced Studies in Energy and Environment, Korea Electric Power Research Institute*

(Received 23 July 1997; accepted 2 February 1998)

ABSTRACT

Complex terrain which is rather typical topographic character in Korea would greatly influence the dispersion of air pollutant. In this study, we investigated how the complex terrain in the vicinity of the coal-fired plant affects the air dispersion modeling results by using several US EPA models: SCREEN, CTSCREEN, ISCLT3, ISCST3, and RTDM. Screening analysis was followed by long-term analysis, and the plume movement over the terrain was precisely tracked for selected cases. Screening analysis revealed that the highest concentration of sulfur dioxide occurs at the downwind distance of 1.3 km under the unstable conditions with weak winds. However, this highest level of SO₂ could be raised by 4 times even in the presence of a hill of 170 m at a distance of 2 to 3 km. Seasonal and annual average concentrations predicted with the ISCLT3, ISCST3, and RTDM models showed a rapid increase of SO₂ levels in front of the high mountains which are located more than 15 km away from the source. The highest concentrations predicted with ISCST3 were significantly higher than those with ISCLT3 and RTDM mainly because ISCST3 chooses simple-terrain model calculations for receptors between stack height and plume height. Although the highest levels under the stable conditions were usually found in the areas beyond 15 km or more, their absolute values were not so high due to enough dispersion effects between the source and the receptors.

Key words : complex terrain, power plant, dispersion modeling, plume prediction

1. 서 론

오염원이 주변환경에 미치는 영향을 예측하기 위한 수단으로는 가우시안 확산모델과 수치모델, 또는

풍동실험과 같은 물리적 모델 등 여러 가지가 있으나, 비교적 손쉽게 간단한 과정을 거쳐 적절한 결과를 얻을 수 있는 가우시안 확산모델이 널리 쓰이고 있다. 가우시안 확산모델을 이용할 때는 대상 오염원과 오염물질, 지형, 기상 등을 고려하여 적합한 모

델을 선정하여야 한다. 미국 EPA에서는 여러 모델들을 시험 · 검증하여 오염원의 영향평가에 사용할 수 있는 모델로써 '우선모델 (preferred model)' 과 '대체모델 (alternative model)' 을 구분하여 추천하고 있다. 우선모델은 여러 시험 항목에서 다른 모델들보다 좋은 결과를 보일 뿐 아니라 사용이 용이한 모델들이다. 대체모델은 모델 결과가 우선모델에 상응하거나, 측정치와의 비교를 통하여 우선모델보다 우수함을 입증할 수 있거나, 혹은 적절한 우선모델이 없을 때 이용할 수 있다.

가우시안 확산모델에서 복잡지형은 주변의 산이나 언덕이 오염원의 배출고도보다 높은 지형을 의미하며, 지세가 비교적 평탄한 지형 또는 주위 지형 지물이 배출고도보다 낮은 지형은 단순지형이라 칭한다. 단순지형 모델은 지표면 농도 계산에서 착지점의 고도만을 고려하는 반면, 복잡지형 모델은 지형의 고도변화에 의한 연기 중심선의 높이 변화를 계산에 반영한다. 그러나 복잡지형 모델도 오염물질이 이동하며 마주치는 지형 전면의 오염도 변화만을 예측할 뿐 지형 후면의 와류 발생이나 복잡지형에 의한 바람상의 변화 등은 수용하지 못하고 있다(USEPA, 1986 and ff.). 그러므로 우리나라에서 흔히 볼 수 있는 것과 같이 복잡지형이 중첩되어 있을 경우에는 지형 후면의 오염농도는 오차를 많이 포함하고 있으므로 유의하여야 한다.

오염원의 영향 평가는 보통 충분한 여유를 두고 최악의 조건까지를 가상하여 예측하는 1차분석과, 1차분석 결과 미리 설정한 기준을 초과할 수 있음이 판명되었을 때 대상 지역의 현실을 감안하여 실시하는 정밀분석의 두 과정으로 나눌 수 있다. 미국 EPA에서 추천하고 있는 복잡지형 가우시안 확산모델 중 CTDMPLUS만이 정밀분석 모델이며, Valley, CTSCREEN, COMPLEX I, SHORTZ/ LONGZ, RTDM은 상세함에서 차이가 있으나 모두 1차분석 모델이다. 정밀분석 모델만이 연기상승 높이 이하 굴뚝높이 이상 착지점에서 오염도를 계산할 수 있으며, 1차분석 모델은 연기상승 높이보다 높은 착지점에만 적용하도록 권장하고 있다. 연기상승 높이가 굴뚝높이 이상 착지점에 대하여 1차분석 모델을 이용할 때에는 단순지형 모델을 함께 이용하여

두 계산 결과 중 높은 값을 취하여야 한다(USEPA, 1986 and ff.).

정밀분석 모델인 CTDMPLUS는 여러 가지 정교한 계산 방식을 채택하고 있으나 통상적으로 측정하지 않는 고도별 상층 기상자료와 태양광 반사율, 시간당 일사량, 토양의 수분량과 관련된 Bowen 비 등 많은 상세한 기상자료를 요구하고 있어 쉽게 사용하기 어렵다(김영성 등, 1997). 이에 따라 미국 EPA에서는 CTDMPLUS의 계산 방식을 그대로 이용하면서 현실 가능한 기상조건의 조합으로부터 CTDMPLUS에 의하여 예측될 수 있는 오염도의 상한선을 제시할 수 있는 CTSCREEN을 추가로 배포하였다(Perry *et al.*, 1990). 한편, 다양한 선택이 가능하여 대기 환경영향평가에 광범위하게 이용되고 있으나 단순지형에만 적용이 가능하였던 ISC2 모델이 최근 ISC3로 개정되면서 복잡지형에 대한 COMPLEX I의 계산 방식을 도입한 ISCST3가 발표되었다(USEPA, 1995).¹⁾

본 연구는 우리나라의 대표적 화력발전소의 하나인 보령화력 주변 지역에 대기질 측정소를 설치하기 위한 작업의 일환으로 주변 지역에 대한 발전소의 영향을 조사하기 위하여 실시되었다(홍옥희 등, 1996). 본 논문에서는 발전소의 대기환경영향 분석과 함께 최근 활발한 복잡지형 모델개발을 포괄적으로 검토하기 위하여 ① 평탄한 지형에 대한 SCREEN (Brode, 1988)과 CTSCREEN의 결과를 비교함으로써 복잡지형이 주변 지역 대기질에 미치는 영향을 조사하고, ② 단순지형 장기모델인 ISCLT3의 결과를 복잡지형 단기모델인 ISCST3, RTDM의 장기 분석 결과와 비교함으로써 복잡지형 모델의 예측 능력을 점검하며, ③ ISCST3와 RTDM을 이용하여 대표적 기상조건에서 연기 중심선이 지형을 마주하였을 때 연기의 이동 모습을 살펴보고자 한다.

2. 복잡지형 모델의 지형효과 계산

2.1 ISCST3

ISC2까지는 평탄한 지형 또는 오염원의 배출고도보다 낮은 단순한 지형을 위한 모델로 지형의 높이가 오염원의 배출고도보다 높을 때에는 지형의

1) 장기모델인 ISCLT3는 복잡지형 계산 방식이 도입되지 않아 그대로 단순지형 모델로 남아 있음.

높이를 굴뚝의 높이로 낮추어 처리하였다. 그러나 ISC3를 발표하면서 복잡지형에도 적용할 수 있도록 단기 모델인 ISCST3에 COMPLEX I의 복잡지형 계산 방식을 포함시켰다(USEPA, 1995). 복잡지형을 마주하였을 때 COMPLEX I의 연기 중심선의 높이 h_e^* 는

$$h_e^* = h_e - (1-c)H_t \quad (1)$$

로 표현된다. 여기서 h_e 는 평탄한 지형에서 연기 중심선의 높이, H_t 는 지형의 고도이다. c 는 지형보정계수로써 불안정하거나 중립인 대기에서는 0.5, 안정한 대기에서는 0을 적용한다. 따라서 안정한 대기에서는 지형의 높이가 연기 중심선에 근접하거나 높아질 수 있으며, 연기 중심선과 지표면의 고도 차이가 10m 이내로 접근하면 고도 차이가 10m를 유지할 수 있도록 중심선의 높이를 높인다. 지형에 의하여 중심선의 높이가 높아질수록 농도는 선형으로 감소하여 h_e^* 가 h_e 보다 400m 높아지면 중심선에서의 농도는 0이 된다.

ISCST3에서는 연기 중심선의 고도보다 높은 착지점에 대해서는 식 (1)을 적용하여 계산하나, 굴뚝 높이보다 높고 연기 중심선의 높이보다 낮은 착지점에 대해서는 EPA의 지침에 따라 단순지형 계산과 복잡지형 계산 결과 중 높은 값을 취한다.

2.2 RTDM

임계 높이를 정의하여 중심선이 임계높이 이상인 연기만이 충분한 에너지를 가지고 산악지형을 넘어갈 수 있다(Paine and Egan, 1987). 임계높이(critical height) H_c 는 Froude 수 Fr 의 함수로 정의된다.

$$H_c = H_t(1 - Fr) \quad (2)$$

H_t 는 지형의 높이이며 Froude 수 Fr 은,

$$Fr = \frac{u}{NH_t} \quad (3)$$

로 나타내어지며, u 는 굴뚝높이에서의 풍속, N 은 Brunt-Väisälä 진동수이다. 보통 $Fr \leq 1$ 이면 대기가 안정하고, $Fr > 1$ 이면 불안정하다. 중립과 불안정 대

기에서 임계높이 H_c 는 0이 되며 연기가 언제나 지형을 쉽게 넘어갈 수 있다.

임계높이 이상에서는 연기 중심선의 높이가 지형의 고도보다 높을 때와 낮을 때로 구분하여,

$$h_e^* = H_{pc} - (1-c)H_{tc} \text{ for } h_e > H_t \quad (4a)$$

$$h_e^* = cH_{pc} \text{ for } h_e \leq H_t \quad (4b)$$

로 표시된다. 이때 $H_{pc} = h_e - H_c$, $H_{tc} = H_t - H_c$ 이며, 변수의 의미는 식 (1)에서와 같고, 지형보정계수 c 는 모든 안정도에서 0.5를 적용한다.

안정한 대기에서 연기 중심선이 임계높이보다 낮을 때는 $c = 0$ 이 되어 연기 중심선이 해수면으로부터 일정한 높이를 유지하게 되고, 연기가 산의 풍상(upstream) 측에서 만날 경우 연기는 지형의 주위를 돌아가게 된다.

3. 입력 조건

3.1 오염원과 지형 조건

보령화력 발전소는 1983년과 1984년 1, 2호기가 준공된 이후 1994년 6월 3~6호기가 증설되어 현재 500MW급 발전기 6개가 운행 중인 국내 최대 유연탄 연소 발전소이다. 표 1은 발전소의 SO₂ 배출 현황이다. SO₂ 외에 주요 오염물질로써 먼지가 각각 1, 2호기 33.83g/s, 3~6호기 33.52g/s씩 배출되고 있다. 본 논문에서는 SO₂를 대상으로 6개의 발전기가 모두 운행될 때 발전소 배출 오염물질이 주변 지역에 미치는 영향을 조사하였다.

그림 1은 보령화력 발전소의 위치와 주변의 지형 모습이다. 발전소는 태안반도와 내륙 사이에 형성된 천수만 입구에 돌출된 지역에 위치하고 있으며, 천

Table 1. Source information.

SO ₂ Emission Rate	5,786 g/s for Stacks #1 and #2, 970 g/s each for Stacks #3 to #6, 961 g/s each
Stack Height	150m
Stack Inside Diameter	6.9m
Gas Temperature	120°C
Gas Exit Velocity	20 m/s

2) 통상의 연기상승 높이와 동일한 의미임. 그러나 연기의 이동을 기술할 때에는 연기 중심선의 의미가 보다 분명하다고 생각되어 이를 이용함.

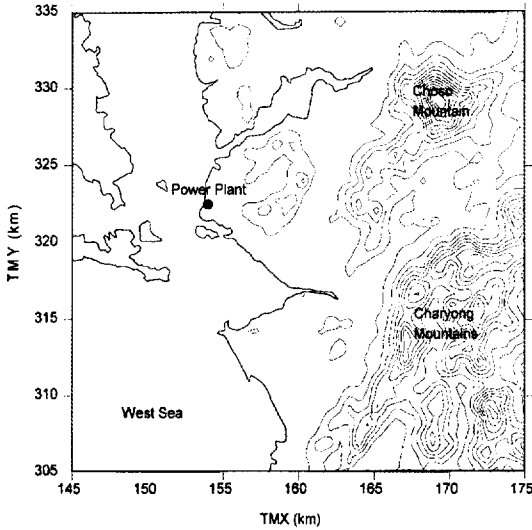


Fig. 1. Location of Poryong Power Plant and topography of the surrounding area. TMX and TMY refer to X and Y axes in the Transverse Mercator grid coordinates. Contour interval is 50 m.

수만을 사이에 두고 태안반도의 하단부인 안면도가 5 km 거리에 있다. 내륙쪽으로 발전소 가까이에 해발 50~70 m의 야산이 분포되어 있고, 3 km 남동쪽에 위치한 해발 235 m의 봉대산으로부터 북동쪽으로 연결된 약 200 m 고도의 낮은 산줄기는 발전소의 동쪽을 둘러싸고 있는 모습이다. 남동쪽으로 약 15 km 떨어져서 해발 600 m 이상의 차령산맥이 북동방향으로 연결되어 있고, 북동쪽으로 약 16 km 떨어진 조서산이 해발 791 m로 이 지역에서는 가장 높다.

3.2 기상 입력자료

기상 입력자료로는 1991년부터 1995년까지 5년간 보령기상 관측소에서 측정한 자료를 이용하였다. 그림 2는 연평균과 계절별 풍향·풍속 분포이다. 연평균은 북동풍과 남서풍이 우세하며, 봄, 여름에는 해안으로부터 불어오는 남서풍과 남남서풍, 가을과 겨울에는 육지로부터 불어오는 북북동풍과 북동풍이 우세하다. 표 2는 5년간 보령지역의 계절별

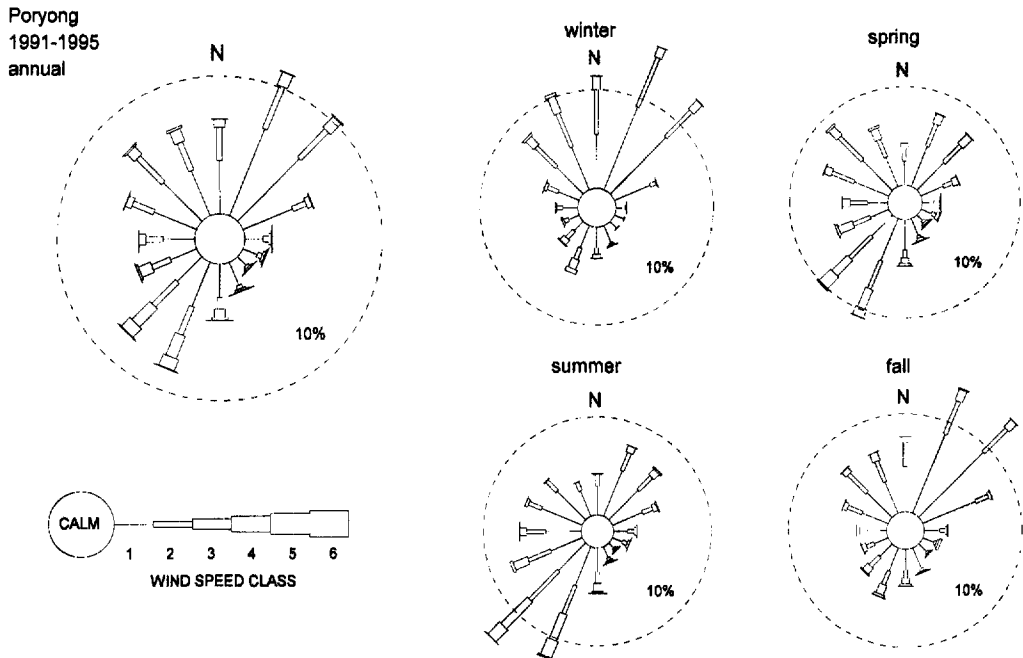


Fig. 2. Annual and seasonal wind roses from 1991 to 1995 at poryong Meteorological station. Calm condition indicates that wind speed is less than 0.3 m/s. Upper bounds of the first 5 wind speed classes are 1.8, 3.3, 5.4, 8.4, and 11.0 m/s, respectively.

Table 2. Frequency distribution of Pasquill stability classes with mean wind speed and temperature at Poryong Meteorological Station between 1991 and 1995.

	A	B	C	D	E	F	Wind Speed (m/s)	Temperature (°C)
Winter	0.0	4.2	13.3	13.3	4.7	58.5	1.53	0.3
Spring	1.6	13.4	7.0	24.1	5.2	48.8	1.85	10.3
Summer	2.1	12.1	5.7	34.8	3.7	41.6	1.88	23.2
Fall	0.0	11.0	10.1	15.2	4.3	59.5	1.47	13.8
Annual	0.8	9.9	9.3	22.6	4.5	52.9	1.66	12.2

Table 3. Specification of mixing height for each season and stability class.

Stability	Method*	Winter	Spring	Summer	Fall	Annual
A	1.5 Z _{max}	2,075	1,508	1,833	2,136	1,800
B	Z _{max}	1,383	1,005	1,222	1,424	1,200
C	Z _{max}	1,383	1,005	1,222	1,424	1,200
D	(Z _{max} +Z _{min})/2	829	640	1,011	1,022	950
E	Z _{min}	275	275	800	620	700
F	Z _{min}	275	275	800	620	700

* Z_{max} and Z_{min} mean maximum and minimum mixing heights, respectively.

안정도 분포와 평균 풍속, 기온이다. 대체로 가장 안정한 F등급의 빈도가 가장 많고, 중립인 D등급의 빈도가 다음으로 많다. 봄, 여름에는 불안정 등급과 함께 중립 등급의 빈도가 많고, 가을, 겨울에는 안정 등급의 빈도가 상대적으로 많다. 연평균 풍속은 1.66 m/s로 해안에 위치한 기상관측소로써는 낮은 수준이며, 여름과 봄의 풍속이 비교적 강한 반면 가을, 겨울의 풍속은 더욱 약하다. 안정도별 혼합고는 1985년부터 1989년까지 발전소 부지에서 측정된 혼합고를 계절별로 평균하여 표 3과 같이 사용하였다(홍옥희 등, 1996).

4. 결과 및 고찰

4.1 SCREEN과 CTSCREEN에 의한 최고 농도

표 4는 지형 조건을 무시한 채 SCREEN을 이용하여 평탄한 지형 조건에서 SO₂의 최고 농도를 계산한 결과이다. 6개의 발전기가 모두 가동되면 풍하 거리 약 1,300 m 지점에서 1시간 평균 최고 농도가 1ppm 이상 높아질 수 있다. 이와 같은 농도는 매우 불안정한 대기 조건에서 풍속이 2m/s로 낮고 혼합고가 연기의 유효 배출고도보다 1m 높아 연기가 혼중(fumigation)될 때 즉, 수평 확산이 억제되고 수

Table 4. One-hour average maximum SO₂ concentration and its occurrence conditions predicted with SCREEN.

	Maximum Concentration (ppm)	Distance from Source (m)	Wind Speed at 10 m (m/s)	Stability	Mixing Height (m)*
Annual	1.13				924.7
Summer	1.24	1,286	2.0	A	875.7
Winter	1.04				974.2

* One meter above the effective plume height.

직 확산이 매우 활발한 상황에서 혼합층에 연기가 갇힐 때 발생할 수 있다. SCREEN에서 계절의 차이는 평균 기온의 차이를 의미하는데, 기온의 차이에 관계없이 최고 농도 발생 조건은 같다. 단지, 기온이 높은 여름철에는 배출 가스와 기온의 차이가 작아 부력에 의한 연기 상승이 상대적으로 제한됨에 따라 연기 상승 높이가 100 m 이상 낮아지고 그만큼 지표면 농도가 높아진다.

표 5는 지형 조건을 고려한 CTSCREEN에 의한 분석 결과이다. 안정과 불안정 조건을 나누어 살펴 보았는데, 불안정 조건에서의 농도가 높으므로 결국 CTSCREEN에 의한 최고 농도는 불안정 조건에서의 최고 농도가 되나, 대기 조건에 따라 모델의 계

Table 5. One-hour average maximum concentrations predicted with CTSCREEN for stable and unstable conditions.

Stable		Unstable	
Maximum Concentration	0.79 ppm	Maximum Concentration	4.7 ppm
Receptor (Elevation)	#45 (100 m)	Receptor (Elevation)	#71 (160 m)
Downwind Distance	2.3 km	Downwind Distance	2.6 km
Wind Direction	286.3°	Wind Direction	286.3°
Wind Speed	1.0 m/s	Wind Speed	1.0 m/s
σ_v	0.75 m/s	Mixing Height	392.9 m
σ_w	0.75 m/s	Convective Velocity Scale, w^*	0.22 m/s
$\partial\theta/\partial z$	0.035° K/m	Monin-Obukhov Length, L	-90 m

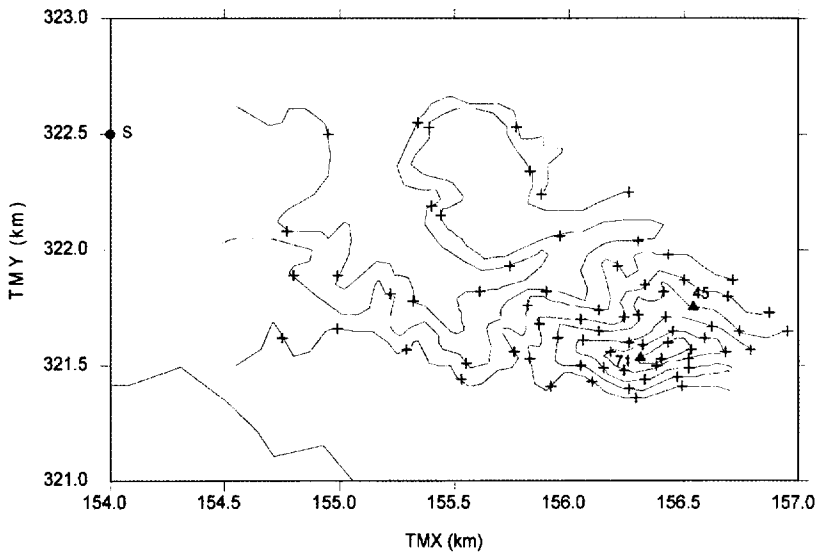


Fig. 3. Receptor locations for CTSCREEN. Crosshairs indicate receptors located along the contour lines. Line in the lower left corner is the shoreline. S indicates source. Contour interval is 20 m. Concentration is the highest at receptor #45 in stable conditions and at receptor #71 in unstable conditions. See Table 5 for details.

산이 현격한 차이를 보이므로 이 둘을 별도로 계산하였다. 그림 3은 CTSCREEN 분석을 위하여 착지점을 배치한 모습이다. 다른 복잡지형 모델과 달리 CTSCREEN은 CTDMPPLUS의 방식을 따라 등고선을 토대로 한 정확한 지형 자료를 필요로 하므로 1차분석이라도 대상 지형을 설정할 필요가 있다. 본 연구에서는 ① 오염원으로부터 1 km 정도의 근거리에서 최고 농도가 나타났던 SCREEN과의 비교를 위하여, ② 풍상측의 복잡지형에 의한 바람장 변화의 영향을 최소화하기 위하여 발전소에서 가장 가까운 동남동 방향의 높이 170 m 봉우리를 대상으로

하였다.

대기가 안정할 때보다 불안정할 때 농도가 높아지는 것은 안정 조건에서도 지형의 높이가 연기의 높이보다 낮아 연기의 중심선이 지형과 직접 마주치지 않기 때문이다. 이에 따라 안정 조건에서도 풍속은 약하나 수직, 수평 방향의 풍속 변화가 커서 확산이 비교적 크고 성층화가 강할 때 풍하거리 2.3 km 지점에서 농도가 높다. 안정 조건에서의 최고 농도는 0.79 ppm으로 SCREEN보다 낮는데, 착지점의 고도가 100 m로 굴퓌 높이보다 낮아 큰 의미는 없다. 불안정 조건 역시 풍속이 약하지만 L의 절

대값이 커서 불안정성이 상대적으로 덜할 때, 연기 높이에 비하여 혼합고가 그리 높지 않아 혼중에 가까운 조건에서 풍하거리 2.6km 지점에서 농도가 높다. 이 때 착지점의 고도는 160m로 연기 높이보다 낮으나 굴퓏 높이보다는 높은데, 최고 농도가 4.7 ppm으로 SCREEN의 예측보다 월등 높게 나타나고 있다.

표 5는 SCREEN으로 예측한, 평지일 때 농도가 가장 높았던 1.3km보다 거리상으로 2배 되는 지점에서 지형의 효과에 의하여 농도가 4배 이상 높아질 수 있음을 보여 주고 있다. 그러나 그림 3에서도 짐작할 수 있는 것과 같이 표 5의 분석은 그림 1의 전체 영역 중 극히 일부만을 대상으로 한 분석이다. 근거리만을 대상으로 한 분석이었기 때문에 표 5에서는 불안정한 조건에서 최고 농도가 나타났으나 복잡 지형의 효과는 안정 조건에서 연기의 중심선이 지형과 마주칠 때 극대화 되는 경우가 많다. 그림 1에서는 북동 방향의 조서산이나 남동 방향의 차령산맥 줄기에서 이와 같은 현상을 예상할 수 있다. 그러나 한편으로는 오염원으로부터의 거리가 충분히 멀어 설사 연기의 중심선이 지형과 마주친다 하여도 지표면 농도는 예상외로 높지 않을 수 있다. 동일한 지형을 대상으로 복잡지형 모델들을 시험한 결과에 의하면 안정 조건일 때 CTDMPLUS의 예측은 다른 모델보다 오히려 낮고, RTDM과 본 연구의 ISCST3에서 이용하고 있는 COMPLEX 1의 계산은 CTSCREEN과 비슷하다(김영성 등, 1997). 10 km 이상 먼거리의 복잡지형의 효과는 논문의 후반에서 복잡지형 모델의 연기 이동 모습과 함께 다시 한번 살펴보고자 한다.

4.2 ISCLT3, ISCST3, RTDM에 의한 장기 분석

그림 4는 단순지형 장기 모델인 ISCLT3와 복잡 지형 단기 모델인 ISCST3 및 RTDM에 의한 1991년부터 1995년까지 5년간의 연평균 SO₂ 농도 분포이다. 전체적인 농도 분포를 알아보기 위하여 x, y 방향 모두 1 km 간격으로 30×30의 착지점을 균일하게 분포시켜 농도를 산출하였다. ISCLT3는 장기 모델이므로 풍향, 풍속 등급과 안정도에 따른 발생 빈도 함수로써 연평균을 계산한데 비하여, 단기 모델들은 5년의 시간당 기상 자료를 차례로 입력하며 연평균 농도를 계산하였다. 대체로 ISCST3에 의한

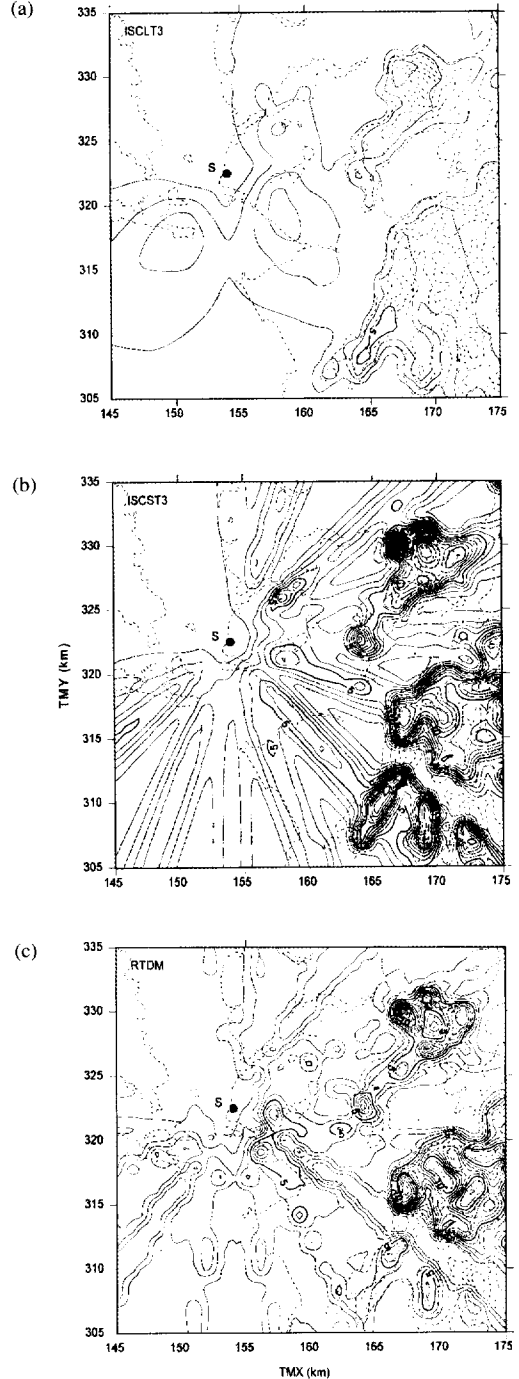


Fig. 4. Annual average SO₂ concentration distributions predicted with ISCLT3, ISCST3 and RTDM. Concentration contour interval is 1ppb. S indicates the source.

Table 6. Seasonal and annual average maximum concentrations predicted with ISCLT3, ISCST3 and RTDM.

	ISCLT3		ISCST3		RTDM	
	Concentration (ppb)	Distance from the Source (km)	Concentration (ppb)	Distance from the Source (km)	Concentration (ppb)	Distance from the Source (km)
Winter	6.40	17.6 SE	15.2	17.4 SE	14.1	18.3 E
Spring	6.49	4.3 ESE	42.5	15.0 ENE	35.2	14.1 ESE
Summer	9.90	15.5 ENE	61.8	15.0 ENE	48.9	15.0 ENE
Fall	5.35	16.7 SE	20.0	16.6 SE	16.9	21.3 E
Annual	5.42	16.7 SE	33.5	15.0 ENE	19.4	15.0 ENE

농도가 높고 RTDM이 다음으로 높으며, ISCLT3의 농도는 매우 낮다. 그림 2의 연평균 풍배도에서는 북북동풍과 북동풍 혹은 남남서풍과 남서풍의 빈도가 많으나 이러한 바람 방향으로는 높은 지형이 없어 농도 지점이 없고, 대신 동북동의 조서산 부근과 동남동과 동남의 차령산맥 줄기의 높은 지형에서 농도가 높다.

표 6은 계절별 평균과 연평균 농도 분포에서 최고 농도 지점들을 조사한 것이다. 연평균으로 볼 때 ISCLT3는 남동 방향의 차령산맥 줄기에서 가장 농도가 높은 반면 ISCST3와 RTDM은 모두 조서산 부근에서 농도가 높고, ISCST3의 최고 농도는 ISCLT3의 약 6배, RTDM의 1.7배이다.

내륙으로의 바람이 여름과 봄에 많은 까닭에 통상적인 경우와 달리 특히 ISCST3와 RTDM는 여름과 봄에 최고 농도가 높다. ISCLT3의 봄과 같이 발전소로부터 동남동쪽으로 4.3 km 떨어진 곳에서 농도가 높기도 하나 대체로 15 km 이상, 17~18 km 떨어진 산지에서 계절평균 내지 연평균이 높다. 풍향이 1차로 중요하지만 복잡지형과 마주하는 연기 중심선을 어떻게 처리하느냐에 따라 착지점의 농도가 달라지므로 같은 계절의 계산에서도 모델마다 농도 뿐 아니라 최고점의 위치도 조금씩 다르다.

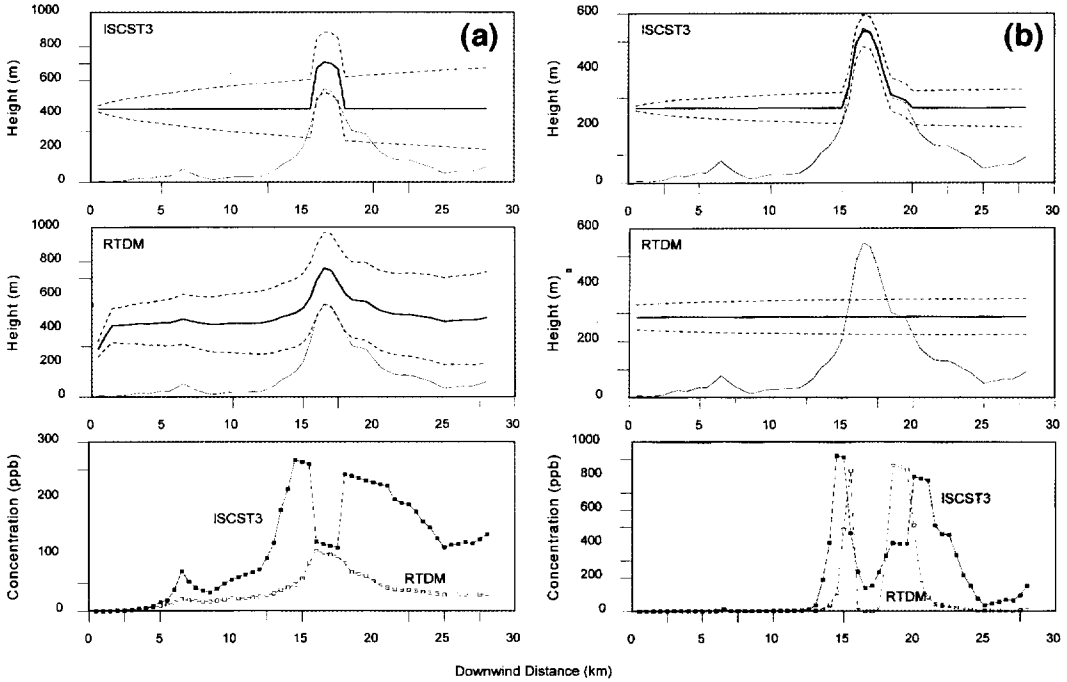
4.3 복잡지형 모델에서 연기의 이동 모습

보령화력에서 여름철은 주풍이 내륙을 향한다는 점에서 특히 유의할 필요가 있다. 그림 5는 표 6에서 여름철에 농도가 가장 높았던 조서산을 향하여 연기가 이동할 때 연기의 이동 모습을 풍하거리 0.5 km 간격으로 살펴본 것이다. 표 2에서 여름철 발생 빈도가 높은 D와 F 등급의 전형적 기상조건을

선택하여 ISCST3와 RTDM의 연기 이동 모습을 비교하였다.

먼저 바람이 4.1 m/s로 강한 중립 조건에서 연기의 이동 모습을 조사한 그림 5(a)에서 ISCST3 계산 결과를 보면, 연기 중심선이 복잡지형을 마주할 때까지는 지형의 변화에 관계없이 중심선이 일정하다. 따라서 지형의 변화는 착지점의 고도 변화로 이어져 풍하거리 6~7 km 부근의 낮은 봉우리에서도 농도가 급격히 높아진다. 이와 같은 상황은 중심선이 지형과 마주칠 때까지 계속되어 10 km 이후 지형의 고도가 높아짐에 따라 농도는 계속 높아지고, 풍하거리 14.5 km에서는 268 ppb로 최고가 된다. 최고점 이후 농도가 다소 감소하는 것은 확산의 영향이며, 여기까지가 기존 ISC에 의한 단순지형 계산이다. 실제 ISCST3 모델은 굴뚝 높이 이상 연기 중심선 이하에서는 복잡지형 계산과 단순지형 계산을 비교하여 높은 값을 취하고 있으나 단순지형 계산이 압도적으로 높아 단순지형 계산 결과만이 나타나 있다. 이후 중심선이 산을 넘어가는 동안은 연기 중심선보다 지형의 높이가 높아 복잡지형 모델인 COMPLEX I의 계산 방식에 의한 계산 결과이다. 계산 방식이 달라짐에 따라 농도가 급격히 낮아지고 있다. 지형의 높이가 중심선 높이 이하가 되면 다시 단순지형 모델로 복귀되어 농도가 높아진다.

불안정 혹은 중립 조건일 때 RTDM은 임계 높이가 0이므로 연기가 지형을 쉽게 넘을 수 있어 연기 이동이 ISCST3보다 자연스럽다. 이에 따라 지표면의 농도에서도 ISCST3에서와 같은 급격한 변화가 없다. RTDM의 연기 중심선의 높이는 식 (4a)와 (4b)를 이용하여 계산한다. 이 식들이 충분히 정확하다면 문제가 아니나 특히 지형의 높이가 굴뚝 높



(a) The conditions are that stability class is D, wind direction is WSW, wind speed is 4.1 m/s, and temperature is 24.6°C. Maximum concentrations are 268 ppb at 14.5 km for ISCST3, and 106 ppb at 16 km for RTDM.

(b) The conditions are that stability class is F, wind direction is WSW, wind speed is 1.3 m/s, and temperature is 23.2°C. Maximum concentrations are 920 ppb at 14.5 km for ISCST3, and 861 ppb at 18.5 km for RTDM.

Fig. 5. Plume behaviors and ground-level concentrations predicted by ISCST3 and RTDM. In the upper two figures, the thin solid line indicates terrain elevation, the thick solid line indicates plume centerline, and the range between two dashed lines indicates (centerline) ± (vertical dispersion coefficient).

이 이상 연기 중심선 높이 이하에서는, 다시 말하면 연기의 중심선이 높은 고도의 지형에 접근해 가는 과정의 농도 계산을 위하여서는 식 (4a)와 (4b)들이 충분치 않을 가능성이 높고, 이에 따라 미국 EPA에서는 단순지형 모델을 함께 사용하여 높은 값을 선택하도록 권고하고 있다. 만일 이와 같은 중간 높이 지형의 계산을 위하여 ISC를 사용한다면 RTDM의 계산에서도 ISCST3에서와 같이 산의 전면과 후면 중심선 높이 부근에서 농도가 급격히 높아질 수밖에 없다. 그러나 앞에서도 언급하였지만, 어떠한 복잡지형 모델도 아직 지형 후면의 복잡한 흐름 변화까지를 고려하고 있지 않으며, 후면의 농도 변화는 전면보다도 훨씬 부정확하다.

그림 5 (b)는 풍속이 1.3 m/s로 낮고 매우 안정된 대기 조건에서 연기의 이동 모습이다. 복잡지형과 마주치기 전 단순지형에서의 연기 중심선의 높이가

그림 5 (a)의 중립인 경우보다 월등 낮음에도 수직 확산폭이 좁아 지표면의 농도가 상대적으로 낮다. ISCST3의 지표면 농도가 산봉우리 전면과 후면에서 높아지는 현상에 대하여서는 앞에서 상세히 기술한 바와 같다. 연기의 중심선이 지형과 마주치게 되면 COMPLEX I의 연기는 최소한의 높이를 유지하며 지형을 따라 이동하며, 중심선으로부터 400 m 높이의 착지점은 농도가 0이 되도록 선형으로 농도가 변한다. 이에 따라 산봉우리를 중심으로 한 ISCST3의 농도는 지형의 고도가 중심선의 높이와 같아지는 양 극대점 사이에서 봉우리의 고도와 정확히 반비례한다.

안정 조건일 때 RTDM은 중심선이 임계 높이 이상일 때만 지형을 넘어갈 수 있다. 그러나 그림 5 (b)의 조건에서는 연기 높이가 임계 높이보다 낮아 연기가 지형을 돌아가며, 봉우리 부근에서는 지표면

농도가 0까지 떨어진다. 연기의 중심선이 지형과 마주치게 되는 전, 후면에서는 ISCST3에서와 유사한 수준까지 농도가 높아지나 확산의 차이로 최고 농도는 약간 낮다.

중립 조건과 안정 조건일 때 최고 농도의 절대값을 비교하면 중립 조건에서는 ISCST3가 중심선이 지형과 마주치는 지점 부근에서 단순지형 모델에 의한 계산으로 월등 높고, 안정 조건에서는 두 모델 모두 지형과 마주치나 ISCST3가 약간 높다. 중립 조건과 안정 조건 중에서는 확산이 억제되는 안정 조건의 최고 농도가 ISCST3는 3.4배, RTDM은 8배나 높다. 그러나 확산이 억제되는 안정 조건에서 연기 중심선이 지형과 마주친 ISCST3의 최고 농도 지점도 풍하거리가 14.5km로 이미 오염원으로부터 상당히 멀다. 이에 따라 CTSCREEN에 의하여 그림 3의 근거리에서 불안정 조건일 때 수 ppm까지 높았던 때의 최고 농도와 비교하면, CTSCREEN의 최고 농도가 연기 중심선이 지표면으로부터 상당한 높이에 있는 상태에서 발생되었음에도 불구하고 ISCST3의 최고 농도 보다 5배 이상 높다.

5. 결 론

보령화력 주변 지역에 대기질 측정소를 설치하기 위한 작업의 일환으로 미국 EPA의 대표적인 대기 확산모델들을 이용하여 발전소에서 배출되는 SO₂가 주변 지역에 미치는 영향을 조사하였다. 환경영향평가가 목적이 아니므로 정량적 분석보다는, 지형과 기상 특성에 따른 주변 지역의 오염도 변화를 주로 정성적으로 살펴보았다.

- ① SCREEN과 CTSCREEN 분석 결과, 평탄한 지형 조건에서는 혼중 현상이 일어날 때 풍하거리 1.3 km 지점에서 최고 농도가 발생되나, 지형 조건을 감안하면 동남동 방향 170 m 높이의 낮은 구릉에 의하여서도 불안정 조건일 때 최고 농도가 4배 이상 높아질 수 있다.
- ② ISCLT3, ISCST3, RTDM을 이용한 장기분석에서는 내륙으로 바람이 불어오는 여름과 봄에 조서산 부근과 차령산맥 북부에서 농도가 높고 연평균 분포에서도 유사한 지점에서 농도가 높다. 농도 예측은 ISCLT3의 연평균 최고 농도가 5.4 ppb인데 비하여, RTDM은 19.4

ppb, ISCST3는 33.5 ppb로 복잡지형 모델의 예측이 월등 높다.

- ③ 같은 복잡지형 모델임에도 RTDM보다 ISCST3의 농도 예측이 높은 것은 주로 골짜기 높이가 이상 연기 상승 높이가 이하의 착지점에 대하여 단순지형 모델과 복잡지형 모델 중 농도가 높은 단순지형 모델 결과를 취한 때문이다. 여름에 조서산 쪽으로 바람이 불어갈 때 안정 조건의 ISCST3와 RTDM의 최고 농도는 중립 조건보다도 3~8배 높으나 이미 오염원으로부터 거리가 충분히 멀어 CTSCREEN에 의한 근거리 최고 농도보다 5배 이상 낮다.

본 논문은 주로 농도 분포 특성을 알아보고자 하였으므로 장기 분석에서는 1 km × 1 km 격자 간격으로 착지점을 배치하였고, 연기 이동 모습은 0.5 km 간격으로 조사하였다. 그러나 정량적 분석을 목표로 한다면 이상의 결과에서 최고 농도가 나타난 착지점을 중심으로 보다 세밀하게 착지점을 배치하여 다시 한번 최고 농도를 산출하여야 한다. 불안정 조건에서는 연기 중심선의 높이가 높고 확산이 주요 역할을 하므로 착지점의 위치 선정이 비교적 덜 까다로우나, 안정 조건에서는 연기 중심선과 지형이 인접하는 지점에서 곧바로 농도가 높아지므로 착지점 위치 선정에 특히 유의하여야 한다.

감사의 글

본 연구는 전력연구원의 “대형 석탄화력 대기오염 감시망 구축 및 확산 예측기술 개발”의 일환으로 수행되었습니다. 연구비를 지원하여 주신 관계자 분들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김영성, 오현선, 윤도영, 장영수 (1997) 복잡 지형의 대기 확산 모델 비교, 한국대기보전학회지(심사 중).
- 홍옥희, 김영배, 천성남, 김현용, 문길주, 김영성, 심상규, 김용표, 김진영 (1997) 대형 석탄화력 대기오염 감시망 구축 및 확산 예측기술 개발, 전력연구원 보고서 '97전력연-단 45.
- Brode, R.W. (1988) Screening Procedures for Estimating the Air Quality Impact of Stationary Sources, EPA-450/4-88-010, Environmental Protection Agency,

- Research Triangle Park, N.C.
- Paine, R.J. and B.A. Egan (1987) User's Guide to the Rough Terrain Diffusion Model (RTDM) (Rev. 3.20), ERT Document P-D535-585, ERT, Inc., Concord, Massachusetts.
- Perry, S.G., D.J. Burns, and A.J. Cimorelli (1990) User's Guide to CTDMPLUS: Volume 2. The Screening Mode (CTSCREEN), EPA/6008-90/087, Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, N.C.
- Perry, S.G., D.J. Burns, L.H. Adams, R.J. Paine, M.G. Dennis, M.T. Mills, D.G. Strimaitis, R.J. Yamartino, and E.M. Insley (1989) User's Guide to the Complex Terrain Dispersion Model Plus Algorithms for Unstable Situations (CTDMPLUS): Volume I. Model Description and User Instructions, EPA-600/8-89-041, Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, N.C.
- U.S. Environmental Protection Agency (1986 and ff.) Guideline on Air Quality Models (Revised), EPA-450/2-78-027R, Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, N.C.
- U.S. Environmental Protection Agency (1995) User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models: Volume I-User Instructions, EPA-450/B-95-003a; Volume II-Description of Model Algorithms, EPA-450/B-95-003b, Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, N.C.