

복잡지형의 대기확산모델 비교

Comparison of Complex Terrain Dispersion Models

김영성 · 오현선 · 윤도영¹⁾ · 장영수²⁾

한국과학기술연구원 환경연구센터

¹⁾광운대학교 화학공학과

²⁾미국 아르곤 국립실험원 환경평가부

(1997년 6월 20일 접수, 1998년 3월 9일 채택)

Young Sung Ghim, Hyun Sun Oh, Do Young Yoon,¹⁾ Young-Soo Chang²⁾

Environment Research Center, Korea Institute of Science and Technology

¹⁾*Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University*

²⁾*Environmental Assessment Division, Argonne National Laboratory, U.S.A.*

(Received 20 June 1997; accepted 9 March 1998)

Abstract

Six complex terrain dispersion models recommended by the U. S. Environmental Protection Agency were investigated using a hypothetical case in which a plume approaches complex terrain. The six models considered were Valley, CTSCREEN, COMPLEX I, SHORTZ, RTDM, and CTDMPPLUS, the latter four being closely studied. Highest concentrations were predicted for 48 receptors and plume behaviors were compared for stable and unstable meteorological conditions. Under stable conditions, ground-level concentrations were determined by the height of the plume centerline above the terrain. The concentrations estimated by SHORTZ and COMPLEX I were higher than those estimated by CTSCREEN, with CTDMPPLUS predicting the lowest concentrations. In particular, the height of the lift midpoint, as well as the centerline of the plume, are important in the model calculation of CTDMPPLUS. Under unstable conditions, the vertical dispersion plays a key role in determining ground-level concentrations. For this case, concentrations predicted by CTDMPPLUS were the highest, whereas those predicted by SHORTZ were the lowest. Concentration distributions predicted by CTDMPPLUS are quite similar to typical Gaussian distributions even on complex terrain, except for a slight shift of the plume centerline due to the effect of the geostrophic wind. In addition, 24-hour average concentrations were estimated for comparison with results from the Valley model. Among the four models studied closely, CTDMPPLUS predicted the lowest 24-hour average concentrations, but the concentrations estimated by Valley were lower than those estimated by CTDMPPLUS.

Key words : complex terrain, dispersion models, plume prediction

1. 서 론

미국 EPA의 정의에 의하면 복잡지형은 대상 오

염원의 배출 높이보다 높은 지형이다(USEPA, 1986 and ff.). 오염원의 하류에 복잡지형이 위치하면 배출된 오염물질이 접근하는 과정에서 지표면의 농도가 높아질 수 있고, 오염원의 상류에 복잡지형이 위치

하여 오염원이 복잡지형 후면의 와류 영역에 놓이면 오염원 주변의 오염물질 농도가 급격히 높아질 수 있다. 그러나 하류의 지형은 복잡하더라도 거리가 멀어 오염물질이 충분히 확산된 상태에서 지표와 마주치게 되면 어차피 농도 자체가 높지 않으므로 지형의 복잡성도 크게 문제되지 않을 수 있다. 반면 상류의 지형은 배출 높이 이상 높지 않더라도 위치와 형태에 따라 오염원을 포함하는 와류를 발생시킬 수 있고, 이와 같은 경우 아직 확산이 충분치 않은 것 배출된 오염물질이 지표에 직접 영향을 미치게 된다는 점에서 심각한 가능성이 많다.

복잡지형의 문제가 어려운 것은 복잡지형의 많은 문제가 최소한 바람장이 복잡한 기상 현상과 맞물려 있기 때문이다. 바람장의 변화는 확산이 아닌 오염물질 이동의 중심선의 변화를 의미하며, 수학적 의미의 가정과 전개 과정만을 본다면 이러한 현상은 가우시안 형태의 대기확산 모델의 대상이 아니다. 이러한 현상을 다루기에는 국지기상과 오염물질 이동을 함께 모사할 수 있는 수치모델이 적합하나 유입 경계가 바다와 같이 평탄하지 않다면 중첩 격자(nested grid)를 사용하든지 아니면 대상영역을 넓히는 등 경계의 변화를 모델 내에 수용하기 위한 조치가 필요하다. 풍동실험은 실제 자연의 일부로써 오염물질의 이동과 확산을 관찰할 수 있다는 점이 가장 큰 장점이나 실험 결과를 실제 크기로 확대 해석하는 과정에서 아직은 정성적 의미 이상을 기대하기 힘들다(김영성과 경남호, 1995).

가우시안 모델의 기본은 표본 수가 많은 자연 현상을 잘 표현하는 정규 분포이다. 수치모델과 풍동실험이 일정 조건의 현상을 정확하게 모사한다면 가우시안 모델은 가능성을 확률로써 표현한다. 따라서 지정된 과거나 일정 조건의 자연 현상을 이해하기에는 수치모델이나 풍동실험이 정확할 수 있으나 불확실한 미래를 과거로부터 확률로써 예측하고자 할 때에는 가우시안 모델이 적합할 수 있다. 가우시안 모델의 두 축은 이동을 나타내는 중심선과 확산이다. 가우시안 모델이 풍향변화에 대하여 매우 경직되어 있고 풍향변화가 모델의 오차를 증폭시키는 가장 중요한 요인으로 인식되고 있으나, 오염원을 중심으로 한 일정 반경내 값으로써 모델 결과를 해석하여 이용한다면 구체적 지점과 시점을 포기한 대신 예측의 정확성을 훨씬 높일 수 있다(USEPA,

1986 and ff.).

상류의 지형 지물에 의한 와류 발생도 주풍이 일정한 정상상태가 아닌 한 가변성이 매우 많다. 가우시안 모델 중 복잡지형 모델이 아닌 ISC (Industrial Source Complex)만이 실험식 형태의 유효 확산계수를 이용하여 확산계수를 변화시킴으로써 상류의 와류 발생에 의한 농도 증가를 고려하고 있다(USEPA, 1992). 가우시안 형태의 복잡지형 모델은 주로 오염물질이 이동하며 마주치게 되는 하류의 지형지물 전면의 농도변화를 계산하기 위한 것이며, 와류 발생 등 지형지물 후면의 복잡한 변화를 모사하기 위한 과정은 포함하고 있지 않다. 미국 EPA에서는 1차 분석을 위한 가우시안 형태의 복잡지형 모델들은 연기상승 높이 이상의 지형에만 사용하도록 권하고 있으며, 굴뚝 높이와 연기상승 높이 사이의 지형에서는 단순지형 모델과 복잡지형 모델 중 농도가 높은 쪽을 택하도록 하고 있다(USEPA, 1986 and ff.). 그러나 정밀 모델로써 최근 발표된 CTDM-PLUS는 지형과 마주칠 때 중심선 변화를 비교적 상세하게 고려한 까닭에 굴뚝 높이와 연기상승 높이 사이에서도 사용이 가능하다.

2. 복잡지형 모델의 종류와 특성

현재 미국 EPA (1986 and ff.)에서는 복잡지형의 1차 분석 모델로써 Valley 모델과 CTSCREEN, COMPLEX I, SHORTZ/LONGZ, RTDM 등을, 정밀 분석 모델로써 CTDMPLUS를 추천하고 있다. 국내에서도 나진균(1990)이 CDM의 연기이동에 지형보정 개념을 도입하여 SCM (Seoul Climatological Model)을 발표하고, 최일경 등(1990)이 삼천포 화력발전소 주변지역을 대상으로 발전소의 영향을 조사하며 ISCST와 함께, Valley, MPTER 등의 모델 결과를 비교한 이래, 최근 장영기 등(1996)이 ISCST, MPTER, Valley, COMPLEX I, SHORTZ의 감응도를 분석하고, 김선태 등(1997)이 악취 확산 평가를 위하여 CTDMPLUS를 이용하는 등 복잡지형 대기확산모델에 대한 관심이 계속되고 있다. 그러나 이와 같은 관심에도 불구하고 국토의 대부분이 산지인 우리나라의 여건에 비추어 복잡지형 대기확산모델 특성에 관한 세밀한 분석과 국내 활용에 관한 적극적인 검토가 부족한 것이 현실이다.

본 논문에서는 우선 동일 조건에서 EPA에서 추천하고 있는 복잡지형 모델들의 단기 예측 결과를 비교하고 예측 과정을 분석하고자 한다. 복잡지형 모델의 국내 활용에 대하여서는 별도의 논문에서 살펴보고자 한다(오현선 등, 1998). 본 논문에서 대상으로 하고 있는 모델들의 특성을 살펴보면 다음과 같다.

2.1 COMPLEX I과 RTDM

COMPLEX I은 Pasquill-Gifford 확산계수를 이용하는데 비하여 RTDM은 Briggs의 확산계수와 Pasquill-Gifford 확산계수, 또는 직접 측정된 난류 크기를 이용한 확산계수를 선택할 수 있다. 두 모델 모두 부력에 의한 확산, 굴뚝 와류효과(stack-tip downwash) 등을 고려할 수 있으며, Briggs의 연기 상승식을 이용한다. COMPLEX I은 단순지형에 대한 MPTER(Multiple Point Gaussian Dispersion Algorithm with TERRain Adjustment; Pierce and Turner, 1980)을 기초로 연돌보다 높은 복잡지형에 적용되도록 개발된 모델이다. 지형의 영향은 대기 안정도에 따라 변하는 지형 보정계수로 고려되며, 지형 보정계수는 연기 중심선의 높이 계산에 이용된다. 지형 보정계수가 1일 때 연기 중심선은 지형을 따라 지표면으로부터의 높이를 그대로 유지하면서 지형의 고도와 함께 변한다. 지형 보정계수가 0이면 연기 중심선은 지형의 고도 변화에 관계없이 지표면이 아닌 해수면으로부터 일정한 높이를 유지한다. COMPLEX I에서는 대기가 중립이거나 불안정할 때는 지형 보정계수 0.5를, 안정할 때는 0을 적용한다. 대기가 안정할 때 연기 중심선보다 지형 고도가 높아지면 연기 중심선은 지표면으로부터 사용자가 정하는 임의의 최소 높이를 유지하게 되는 데, 최소 높이로는 통상 10m를 지정한다.

RTDM(Rough Terrain Diffusion Model)은 대기가 안정할 때 산악지형을 넘어갈 수 있는 높이와 넘어가지 못하는 높이의 경계를 임계높이(critical height)로 구분하여 각기 다른 지형 보정계수를 이용한다(Paine and Egan, 1987). 임계높이는 풍속과 지형 고도의 함수인 Froude 수에 의하여 정의되며, 대기가 불안정하거나 중립일 때 임계높이는 0이 된다. 즉, 불안정하거나 중립인 대기에서는 연기가 언덕을 쉽게 넘어갈 수 있음을 의미한다. 안정된 대기 조건에

서는 ① 연기 중심선이 임계 높이 이상일 때는

$$H_a = H_{pc} - (1 - c) H_c$$

연기 중심선이 지형의 고도보다 높을 때

$$H_a = c H_{pc}$$

연기 중심선이 지형의 고도보다 낮을 때

H_a 는 지형 효과를 고려한 연기 중심선의 높이이며, c 는 0~1 사이의 지형 보정계수로 보통 0.5를 사용한다. $H_{pc} = H_p - H_c$, $H_c = H_t - H_c$, H_p 는 평지에서 연기 중심선 높이, H_c 는 임계높이, H_t 는 지형의 고도이다. ② 연기 중심선이 임계높이보다 낮을 때는 c 가 0으로, 연기 중심선이 해수면으로부터 일정한 높이를 유지하여 산의 풍상측에서 지표면에 부딪칠 수 있다.

2.2 SHORTZ와 Valley

SHORTZ와 Valley는 점오염원 뿐 아니라 면오염원도 취급할 수 있다. SHORTZ는 건물 오염원도 취급할 수 있고, Briggs의 식을 수정한 연기 상승식을 이용하며, 굴뚝 와류효과, 입자에 대한 건성침착과 중력침강을 고려할 수 있다(Bjorklund and Bowers, 1982). 확산계수는 Cramer 등(1975)이 난류의 세기(turbulent intensity)를 토대로 제한한 값을 사용한다. 복잡한 지형에서도 혼합층 내 연기 중심선의 해발고도가 일정하여 연기 중심선이 지표면에 부딪칠 수 있다.

Valley는 24시간 또는 그 이상의 기간에 대한 확산모델로, Briggs의 연기 상승식과 Pasquill-Gifford의 수직 확산계수를 이용한다(Burt, 1977). 수평방향으로는 확산계수를 사용하는 대신 중심축으로부터 선형(linear)의 농도 감소를 가정하며, 16방위로 7개의 착지점에서 농도가 산출된다. 단기모델임에도 장기모델과 같이 매시간 기상자료가 아닌 16방위 풍향, 풍속 등급과 대기안정도 등급의 발생빈도 자료가 필요하다. 안정 조건에서는 기본적으로 지형에 따라 연기 중심선의 높이가 변하지 않으며, 지형의 고도가 연기 중심선보다 높아질 때에만 최소의 높이를 유지하면서 지면을 따라 상승한다. 중립 또는 불안정 조건에서는 연기 중심선이 지형을 따라 지표면으로부터 항상 일정한 높이를 유지한다.

2.3 CTDMPLUS와 CTSCREEN

초기의 CTDM (Complex Terrain Dispersion Model)은 안정한 대기와 중립인 대기에서 복잡한 지형의 영향을 고려하기 위한 모델이었으나 후에 Perry 등(1989)이 난류혼합이 활발한 대기로 배출된 연기에 대한 알고리즘을 추가하여 불안정한 조건을 포함한 단기 확산모델인 CTDMPLUS (CTDM PLUS Algorithms for Unstable Situations)를 개발하였다. CTDMPLUS와 기존의 복잡지형 모델의 가장 큰 차이점은 지형에 의한 유선의 편향(deflection)과 뒤틀림(distortion)을 고려하여 연기의 수직, 수평 확산계수를 변화시키고, 대류가 활발한 불안정한 대기에서는 수직 방향으로 정규분포가 아닌 연기 중심선이 지표면을 향하는 것과 같은 비대칭 확산분포를 적용한다는 점이다. 안정 또는 중립조건에서 연기 중심선이 지형과 마주할 때도 지형 보정계수를 이용하는 대신 운동에너지와 Brunt-Väisälä 진동수의 관계로부터 임계높이 H_c 를 계산하여 임계높이를 경계로 연기를 언덕을 넘어갈 수 있는 운동에너지를 가지고 있는 부분과 언덕을 넘어가지 못하고 우회하는 부분으로 나누어 취급한다. 연기상승 계산은 기본적으로 Briggs의 식에 의하나 최종 혹은 중간 높이가 중에서 가장 낮은 높이를 선택하며, 이때 안정 조건에서는 연기의 휘어짐과 무풍조건, 중립조건에서는 강한 바람, 불안정 조건에서는 연기의 붕괴, 지면 접촉 등도 고려한다.

표 1은 복잡지형 모델들이 필요로 하는 기상 요소를 비교한 것이다. RTDM과 SHORTZ가 선택에 의하여 난류 측정치를 사용할 수 있으나 CTDM-

PLUS는 수치모델에 상응하는 수준의 기상 측정자료를 필요로 한다. 따라서 꼭 필요한 경우외에 CTDMPLUS를 이용하는 것은 낭비일 수 있다. CTSCREEN은 CTDMPLUS의 필요성을 1차 검증하기 위한 1차 분석 모델이다. 표 2는 CTSCREEN에서 사용하는 기상자료이다(Perry *et al.*, 1990). CTSCREEN에서는 주어진 지점에 대하여 표 2의 기상 조건을 차례로 적용시켜가며 CTDMPLUS의 계산 방식에 따라 최악의 농도를 계산한다.

Table 2. Meteorological matrix employed by CTSCREEN.

Stability	Variable ^a	Specified Values				
Stable	U (m/s)	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
	σ_v (m/s)	0.3	0.75			
	σ_w (m/s)	0.08	0.15	0.30	0.75	
	$\partial\theta/\partial z$ ($^{\circ}$ K/m)	0.01	0.02	0.035		
Exceptions: ① If $U \leq 2$ m/s, $\sigma_v = 0.3$ m/s, then include $\sigma_w = 0.04$ m/s in the matrix. ② If $\sigma_w = 0.75$ m/s, $U \geq 3.0$ m/s, then $\partial\theta/\partial z$ is limited to 0.01° K/m. ③ If $U \geq 4$ m/s, then $\sigma_w \geq 0.15$ m/s ④ $\sigma_w \leq \sigma_v$						
Unstable	U (m/s)	1.0	2.0	4.0	6.0	
	u_* (m/s)	0.1	0.3	0.5		
	L (m)	-10	-50	-90		
	Z_i (m) ^b	0.5h ^c	1.0h ^c	1.5h ^c		

^a U=wind speed, σ_v =standard deviation of horizontal wind speed, σ_w =standard deviation of vertical wind speed, $\partial\theta/\partial z$ =potential temperature gradient, u_* = friction velocity, L=Monin-Obukhov length, Z_i =mixing height
^b Above Z_i , $\partial\theta/\partial z$ is equal to 0.03° K/m.
^c h=terrain height

Table 1. Meteorological data required by complex terrain dispersion models.

Meteorological Data	COMPLEX I	RTDM	SHORTZ	Valley	CTDMPLUS ^a	CTSCREEN
Wind Speed and Direction	○	○	○	Wind Speed/ Direction,	○	Not Required;
Temperature	○	○	○		○	Use Only
Hourly Mixing Height, Z_i	○	○	○	Stability Joint	○	Prescribed
Surface Friction Velocity, u_*				Frequency,	● ^b	Data (See
Monin-Obukhov Length, L				Maximum,	● ^b	Table 2).
Pasquill Stability Classes	○	○	○	Minimum		
Surface Roughness Length				Mixing	○	
Turbulence Data, σ_w , σ_v		● ^c	● ^c	Heights	○	

^a Also requires upper air sounding data such as pressure, geopotential height, temperature, wind speed/direction.

^b Calculated by preprocessors using site latitude, longitude, time zone, surface roughness length, albedo, Bowen ratio, hourly solar radiation, mixing height, cloud ceiling height, cloud cover, hourly cloud ceiling, sea-level pressure, temperature, dew point, wind direction, wind speed, cloud cover.

^c Optional.

3. 모의실험 방법

CTDMPLUS 시험을 위하여 CTDMPLUS 프로그램과 함께 제공된 자료를 모의 실험조건으로 이용하였다. CTDMPLUS를 위한 입력 자료라면 다른 모델의 입력자료를 충분히 마련할 수 있을 뿐 아니라 CTDMPLUS의 특성을 가장 잘 부각시킬 수 있는 조건을 선정하였을 것이라는 판단 때문이었다. 즉, 본 논문에서는 미국 EPA에서 CTDMPLUS를 정밀모델로써 추천하고 있는 만큼 일단 이를 중심으로 다른 모델의 예측 정도를 비교하고자 하였다.

그림 1은 대상 지역의 지형과 오염원 및 오염물질 농도가 계산될 착지점의 위치이다. 오염원 남남동쪽으로 약 1,750 m 지점에 산의 정상이 있고, 오염원과 산 정상 사이의 해발고도 차이는 368 m이다. 산지

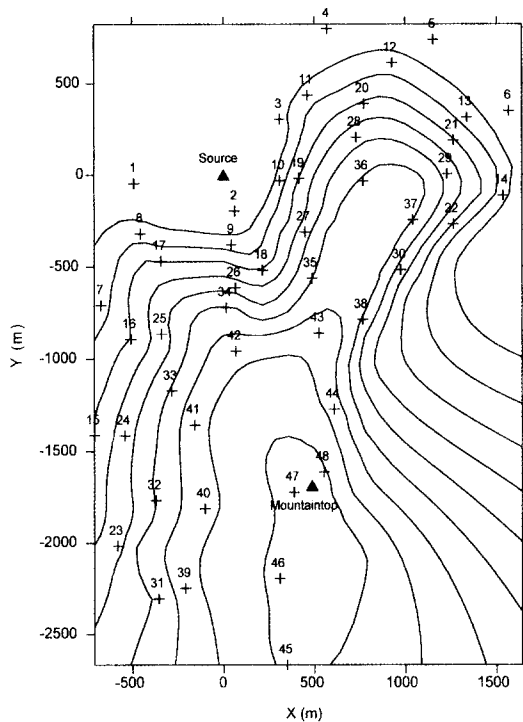


Fig. 1. Topography of the target area and locations of source and receptors. Contour interval of elevation is 40 m; height of the mountaintop is 368 m. Crosshair indicates the receptor location; number is the receptor number.

Table 3. Source information.

Location	(0, 0)
Stack Height	190 m
Stack Inner Diameter	3.36 m
Gas Temperature	137.3°C
Gas Exit Velocity	25.06 m/s
Emission Rate	100 g/s

외에 오염원 주위를 비롯한 대상 지역내에 주요 건물 등이 존재하지 않으며, 표면의 거칠기 길이는 0.14 m이다. 오염물질의 배출조건은 표 3과 같다. 배출량은 매시간 일정하며, 건성침착이나 중력침착, 화학반응 등에 의한 오염물질의 소멸은 없는 것으로 가정하였다.

표 4는 모의 실험의 기상조건이다. 24시간을 가정하여, 대기 조건은 오전 6시부터 오후 7시까지 불안정하고 야간에는 안정하며, 풍향은 대체로 오염원 으로부터 산 정상이나 산 정상 우측을 향하여 오염원에서 배출된 연기가 언제나 복잡지형을 마주하도록 하였다. 표 4는 24시간 기상조건을 보여주고 있으나 본 연구의 대상인 복잡지형 모델들은 정상 상태를 가정한 플룸모델이므로 실제에 있어 시간에 따른 기상 변화는 의미를 지니지 못한다. 즉, 과거의 변화 기록이 현재에 영향을 미치지 못하며, 따라서 매 시간의 기상은 독립적이다.

본 연구에서는 표 4의 기상 조건을 크게 안정과 불안정 조건으로 나누어 모델의 계산 결과를 비교하였다. 먼저, 복잡지형 모델을 ① 주어진 지형과 오염원 조건에서 최고 농도를 산출하는 CTSCREEN, ② 실제 기상 조건을 이용하는 COMPLEX I, RTDM, SHORTZ, 그리고 ③ 정밀분석을 위한 CTDMPLUS 로 나누어 각기 안정 조건과 불안정 조건에서 그림 1의 착지점에 대하여 지표면 최대 오염도를 계산하여 비교하였다. Valley는 24시간 혹은 그 이상의 시간에 대한 평균 농도를 계산하므로 별도 비교하였다. CTDMPLUS가 정밀모델로써 가장 최근에 발표되었고 연기의 이동과 확산에 대하여 정교한 계산 방식을 채택하고 있으므로 이를 기준으로, 각 모델에서 지형을 마주할 때 연기 중심선과 수직 확산 변화를 살펴보고 각 모델들의 최고 농도와 발생조건이 차이를 보이는 원인을 분석하였다.

Table 4. Meteorology used for a trial modeling.

Time (h)	Wind Speed (m/s)	Wind Direction (degree)	Temperature (°C)	Pasquill Stability	Mixing Height (m)	σ_{θ}^a (deg/s)	σ_w^b (m/s)
0100	1.2	300	26.1	6	92	1.0	0.03
0200	1.1	320	26.0	6	79	2.6	0.02
0300	0.6	330	25.6	6	82	6.3	0.01
0400	1.3	325	25.4	6	86	5.3	0.01
0500	1.0	315	24.9	6	76	3.5	0.02
0600	1.1	330	24.7	2	76	4.3	0.04
0700	2.1	310	24.8	2	76	4.5	0.08
0800	2.2	340	24.9	1	540	7.9	0.19
0900	2.2	335	25.0	1	1,041	13.9	0.39
1000	2.2	328	26.2	1	1,086	13.6	0.49
1100	2.3	305	26.9	1	1,142	14.6	0.47
1200	2.4	318	27.5	1	1,215	17.0	0.53
1300	2.1	320	28.1	1	1,298	14.9	0.53
1400	1.2	310	26.1	1	1,379	1.0	0.03
1500	1.1	320	26.0	1	1,456	2.6	0.02
1600	0.6	335	25.6	1	1,519	6.3	0.01
1700	1.3	340	25.4	1	1,564	5.3	0.01
1800	1.0	328	24.9	1	1,587	3.5	0.02
1900	1.1	325	24.7	2	1,590	4.3	0.04
2000	2.1	320	24.8	6	121	4.5	0.08
2100	2.2	320	24.9	6	86	7.9	0.19
2200	2.2	338	25.0	6	76	13.9	0.39
2300	2.2	333	26.2	6	79	13.6	0.49
2400	2.3	333	26.9	6	79	14.6	0.47

^a standard deviation of wind direction angle

^b standard deviation of vertical wind speed

4. 결과 및 고찰

4.1 CTSCREEN에 의한 지표면 최고 농도의 계산

표 5는 CTSCREEN으로 계산한 안정 조건과 불안정한 조건에서의 지표면 최고 농도와 최고 농도 발생 조건이다. 2.3항에서도 언급한 것과 같이 표 5의 최고 농도는 표 4의 기상조건이 아닌 표 2의 기상 조건을 각 착지점마다 차례로 대입시켜 가며 계산한 농도이기 때문에 그림 1의 지형조건과 표 3의 배출조건에서 가능한 최고 농도이다. 안정 조건의 농도가 더 높으므로 절대 최고 농도는 결국 안정 조건에서의 최고 농도이나, 안정 조건과 불안정 조건에 따라 모델의 계산방식이 현저한 차이를 보이므로 이를 비교하기 위하여 각 조건에서의 최고 농도를 별도로 산출하였다.

먼저 안정 조건에서 농도가 높아지는 과정을 살펴보면, 축방향으로의 풍속이 2 m/s로 비교적 낮고

수평·수직 방향의 풍속 변화가 작아 확산이 약하며 성층화가 강할 때, 연기 중심선이 임계높이보다 15 m 낮아 중심선이 지형을 우회하는 과정에서 중심선 바로 윗부분 42번 착지점에서 농도가 가장 높다. 불안정 조건에서는, 풍속이 1 m/s로 낮고 혼합고 높이가 산 정상 높리와 같으며 Monin-Obukhov 길이 L의 절대값이 커 불안정성이 상대적으로 덜할 때, 산정상에 인접하고 높이가 같은 2개의 착지점 중 경사가 완만한 쪽에 위치한 47번에서, 연기 중심선이 착지점보다 26 m 낮아 연기가 지형을 따라 상승하는 과정에서 농도가 가장 높아지고 이때 혼합층 위로의 투과율은 26%이다.

4.2 모의 기상조건에서의 모델별 최고 농도

표 5는 실제 기상조건과 무관하게 도출된 각기 안정과 불안정 조건에 대한 1차 분석값이다. 표 6은 COMPLEX 1, RTDM, SHORTZ, 그리고 CTDM-PLUS를 이용하여 각각 표 4의 안정과 불안정 조건

Table 5. One-hour average maximum concentration and its occurrence predicted by CTSCREEN for stable and unstable conditions.

Stable		Unstable	
Concentration	1.595 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Concentration	761 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Receptor (Elevation)	#42 (304.8 m)	Receptor (Elevation)	#47 (365.8 m)
Wind Direction	349.4°	Wind Direction	344.7°
Wind Speed	2.0 m/s	Wind Speed	1.0 m/s
σ_y	0.30 m/s	Mixing Height	378 m
σ_z	0.04 m/s	Convective Velocity Scale, w_c	0.22 m/s
$\partial\theta/\partial z$	0.035° K/m	Monin-Obukhov Length, L	-90 m
Critical Height, H_c	319.1 m	Plume Height	340.2 m
Plume Height	304.1 m	Plume Penetration	0.26

Table 6. Comparison of 1-hour average maximum concentrations and their occurrences predicted by various complex terrain dispersion models.

Stability	Model	Maximum Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Receptor (Elevation, m)	Hour	Wind Speed (m/s)	Effective Plume Height (m)
Stable	COMPLEX I	1,930	#43 (304.8)	0300	0.6	288.3
	RTDM	1,158	#43 (304.8)	0300	0.6	296.0
	SHORTZ	6,279	#43 (304.8)	0300	0.6	290.5
	CTDMPLUS	258	#43 (304.8)	2300	2.2	350.1
Unstable	COMPLEX I	163	#35 (243.8)	1200	2.4	491.0
	RTDM	97	#43 (304.8)	1200	2.4	485.4
	SHORTZ	50	#48 (365.8)	0900	2.2	669.9
	CTDMPLUS	215	#26 (182.9)	1700	1.3	371.9

Table 7. Prediction of CTDMPLUS for receptor #43 (elevation, 304.8 m) at 0300 and 2300 hours.

Hour	Final Plume Rise (m)	Critical Height, H_c (m)	Lift Midpoint (m)	Lift/ Wrap	Dispersion Coefficient				Conc. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
					Flat Terrain (m)		Hill-Induced Effective (m)		
					σ_y	σ_z	σ_{ye}	σ_{ze}	
0300	333.3	182.7	280.3	L	109.6	41.0	95.6	41.0	15
				W	101.4	41.0	101.4	41.0	0
				Total					15
2300	350.1	238.4	308.2	L	234.2	64.0	204.7	66.9	257
				W	233.3	63.9	233.3	63.9	1
				Total					258

에서 최고 농도를 계산한 결과이다. 2절의 복잡지형 모델 중 Valley는 1시간 평균 농도 계산이 가능하지 않아 제외하였다. 안정 조건일 때 최고 농도는 CTDMPLUS를 제외하고는 모두 풍속이 가장 약한 오전 3시에 발생하고 있다. 어느 경우나 연기 중심선이 착지점 바로 아래 위치하여 연기가 지형을 따

라 상승하는 과정에서 농도가 높다. RTDM은 연기 중심선의 높이가 착지점과 가장 가까움에도 중심선 이동과 확산 계산방식의 차이로 세 모델 중 최고 농도가 가장 낮다.

CTDMPLUS는 최고 농도가 나타나는 시간이 다를 뿐 아니라 농도도 가장 낮다. 표 7은 다른 모델

에서 농도가 가장 높았던 3시와 CTDMPPLUS에 의하여 최고 농도가 나타나는 시간으로 예측된 23시에 43번 착지점에 대한 CTDMPPLUS의 계산 결과를 비교한 것이다. 3시에는 연기 상승이 23시보다 낮으나 임계 높이 H_c 가 43번 착지점보다 120 m 이상 낮아 연기가 지형을 넘어가는 중에 착지점을 만나게 된다. 23시의 연기 중심선은 3시 혹은 여타 모델의 중심선 예측 혹은 43번 착지점 고도보다 월등 높으나, 착지점보다 66 m 낮은 지점에 임계 높이가 위치하며 지형을 따라 상승하는 부분의 중심선이 43번 착지점의 높이와 거의 일치되면서 농도가 높아지며, 작지만 우회하는 부분의 농도도 중첩되고 있다.

불안정 조건일 때 COMPLEX I과 RTDM은 모두 풍속이 가장 강한 12시에 농도가 가장 높다. 연기 상승은 COMPLEX I이 약간 높으나 최고 농도 착지점은 오히려 RTDM보다 가깝고 지표면 고도도 낮은 곳에서 나타나고 있다. SHORTZ는 연기 상승

이 가장 높고 이에 따라 산 정상부근에서 풍향에 의한 연기 중심선과 착지점의 거리가 가장 가까운 9시에 48번 지점에서 농도가 가장 높으나 이미 이동 거리가 길어 최고 농도가 가장 낮다. 안정 조건일 때와 반대로 불안정 조건일 때는 CTDMPPLUS의 최고 농도 예측이 가장 높다. 뿐만 아니라 표 4의 17시 풍향 340°에 비하여 최고 농도 착지점도 약간 왼쪽에 위치하고 있는데 CTDMPPLUS에서는 혼합층내에서 지균풍에 의한 수직방향의 풍향변화를 고려할 수 있기 때문이다.

그림 2는 17시 조건에서 CTDMPPLUS와 RTDM에 의한 농도 분포이다. RTDM의 농도분포는 고농도 지점들이 17시 풍향 340°를 중심으로 배치되어 있으나 등농도 곡선은 지형의 직접적인 영향으로 풍향에 의한 중심축으로부터 변화가 많다. 반면, CTDMPPLUS의 분포는 중심축이 17시 풍향으로부터 왼쪽으로 옮겨져 있을 뿐 연기가 지형을 따라 자연스럽게 이동하여 농도분포는 정상적인 가우시

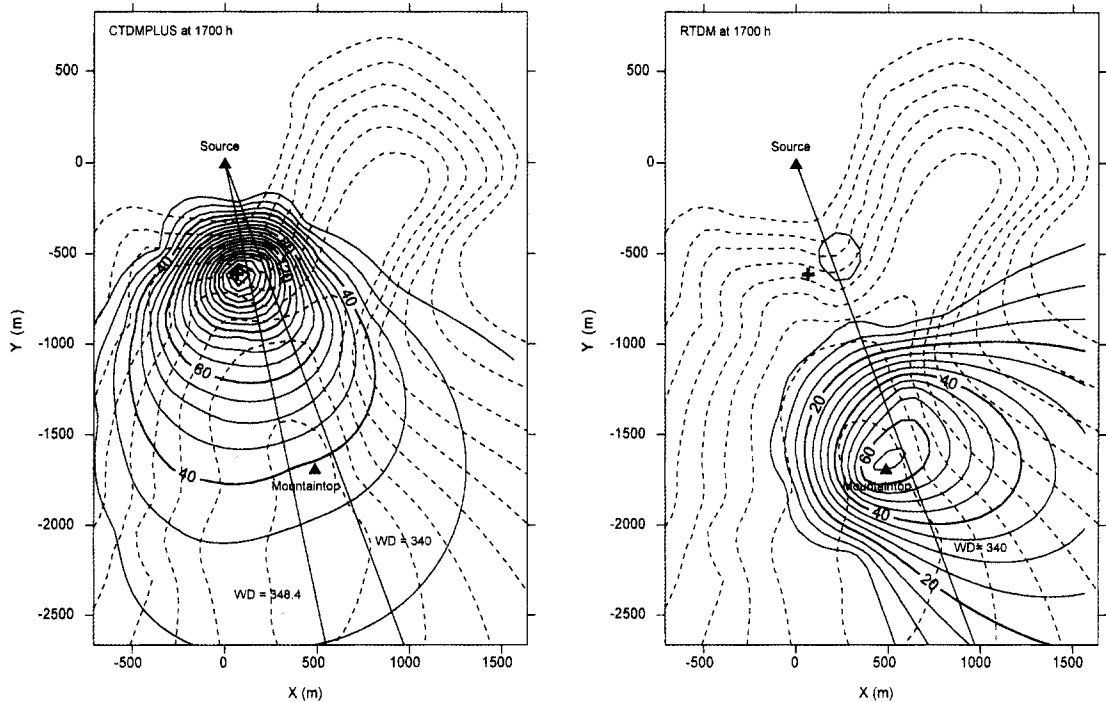


Fig. 2. Concentration distributions on the ground predicted by CTDMPPLUS and RTDM at 1700 hour. Crosshair indicates receptor #26 where CTDMPPLUS predicted the highest concentration. WD is wind direction expressed in degrees.

안 분포와 크게 다르지 않다. CTDMPLUS에서는 측정치가 주어지지 않을 경우 Tennekes (1981)의 관계식에 의하여 혼합층내 수직방향 풍향변화를 계산하고 있는데, 그림 2의 풍향 348.4°는 CTDM-PLUS에서 계산한 연기 중심선 높이에서의 풍향이다. 안정 조건에서는 연기상승이 낮아 수직방향 풍향변화가 중요하지 않은 반면, 불안정 조건에서 연기 상승이 높을 때에는 그림 2와 같이 수직방향 풍향변화에 의한 농도 분포 변화도 가능하다.

CTSCREEN에 의한 표 5의 최고 농도는 그림 1의 지형 조건과 표 3의 배출조건에서 가능한 절대 최고 농도의 의미를 지니고 있음에도 안정 조건에서 표 6의 COMPLEX I과 SHORTZ는 CTSCREEN에 의한 최고 농도보다도 높다. CTSCREEN이 CTDMPLUS의 계산방식을 이용하고 있으므로 반드시 절대 최고 농도라는데 대하여 이견이 있을 수

있으나 ① CTSCREEN이 SCREEN의 이름이 붙어 1차 분석모델로서 발표되었고, ② CTDMPLUS가 정밀모델로써 최근에 발표되었다는 점에서 적어도 예측 가능한 신뢰성 있는 최고 농도일 가능성이 높다. 이러한 관점에서 본다면 안정 조건에서의 COMPLEX I과, 특히 SHORTZ의 계산치는 1차 분석을 위하여서도 너무 높다.

4.3 안정 조건에서 지형에 의한 연기 이동의 변화

안정 조건에서는 연기의 수평, 수직확산이 작아 오염원 주변의 낮은 착지점은 오염원의 영향을 거의 받지 않는다. 그러나 지형의 고도가 연기의 중심선보다 높거나 상응하게 높으면 연기의 중심선이 접근하는 과정에서 농도가 급격히 높아질 수 있다. 안정 조건에서 모델의 결과가 차이를 보이는 것은

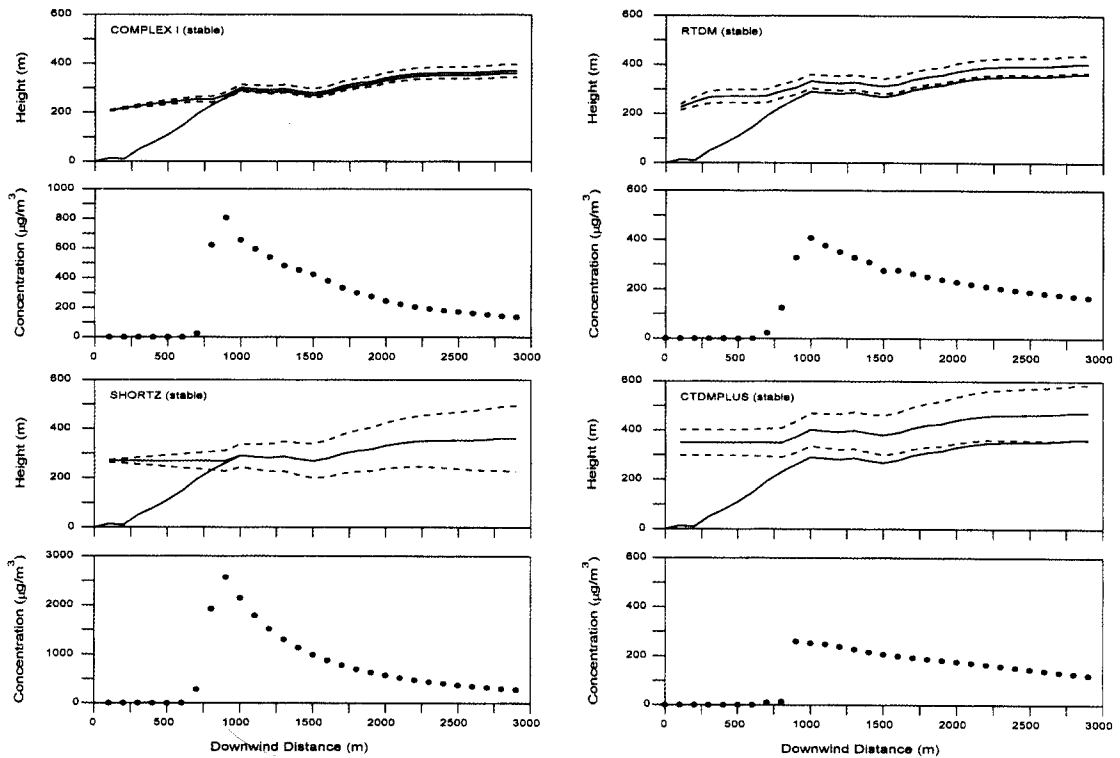


Fig. 3. Plume behaviors predicted by various complex terrain dispersion models under stable conditions at 2300 hour. In the upper figure, the thin solid line indicates terrain elevation, the thick solid line indicates plume centerline, and the upper and lower dashed lines indicate (centerline) \pm (vertical dispersion coefficient). The lower figure shows a concentration distribution on the ground.

연기가 지형에 접근하는 모습과 확산의 정도가 다르기 때문이다. 그림 3은 표 6의 안정 조건에서 CTDMPPLUS의 농도가 가장 높았던 23시에 풍하 방향을 따라 각 모델이 예측한 연기의 이동 모습을 비교한 것이다.

COMPLEX I에서는 지형이 중심선보다 높아지면 중심선은 최소 높이 10m 높이를 유지하며 지형을 따라간다. RTDM은 중심선이 지형과 마주칠 수도 있으나 23시 조건에서는 임계높이가 188m로 낮아 연기가 지형을 따라 이동하고 있으며, 그림에서 쉽게 구별되지 않으나 지형 보정계수로써 0.5를 사용하여 지형이 높아질수록 중심선의 높이가 지형과 가까워진다. SHORTZ에서는 연기 중심선이 지형과 직접 마주치게 되므로 농도가 가장 높다. SHORTZ 다음으로는 중심선이 지형에 얼마나 인접하였느냐에 따라 COMPLEX I, RTDM 순으로 농도가 높다. CTDMPPLUS는 연기상승이 높을 뿐 아니라 표 7에

서 이미 살펴본 바와 같이 중심선이 지형에 접근하는 과정에서 대부분의 연기가 충분한 운동에너지를 가지고 지형 위를 이동하게 되어, 최고 농도 착지점의 농도가 가장 낮고 이후의 농도감소도 다른 모델에 비하여 완만하다.

4.4 불안정 조건에서 지형에 의한 연기 이동의 변화

그림 4는 표 6의 불안정 조건에서 CTDMPPLUS의 농도가 가장 높았던 17시에 풍하 방향을 따라 각 모델이 예측한 연기의 이동 모습을 비교한 것이다. 표 6에도 나타나 있지만 연기상승이 그림 3의 안정 조건보다 월등 높고 수직확산도 크다. 불안정 조건에서는 연기 중심선 위치가 지표면 농도에 중요한 역할을 한 반면, 그림 4에서는 수직 확산의 모습에 의하여 지표면 농도가 결정되는 양상을 보이고 있다. 표 6에서 CTDMPPLUS 다음으로 COMPLEX I의

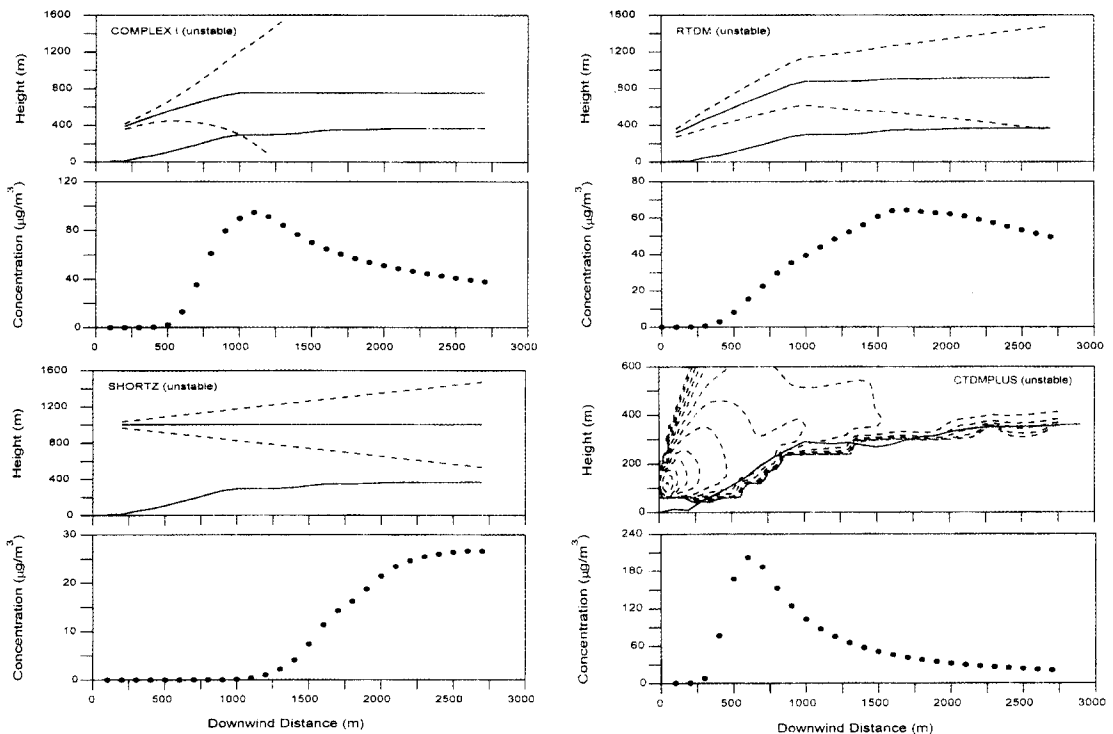


Fig. 4. Plume behaviors predicted by various complex terrain dispersion models under unstable conditions at 1700 hour. The lines in the upper figure and lower figure have the same interpretation as those in Figure 3. Only the upper figure of CTDMPPLUS shows a vertical distribution of concentration.

최고 농도가 높은 것은 주로 COMPLEX I의 수직 확산이 거리에 따라 급격하게 커지기 때문이다. 이에 따라 COMPLEX I에서는 수직 확산계수 곡선이 지표면과 마주치는 부근에서 지표면 농도가 가장 높고 수직방향의 활발한 혼합으로 최고점을 지난 후 농도감소도 CTDMPLUS보다 완만하다.

RTDM과 SHORTZ는 연기상승이 높는데 비하여 확산이 크지 않아 상대적으로 오염원으로부터 거리가 멀고 고도가 높은 착지점에서 농도가 높다. 특히 SHORTZ는 연기상승이 가장 높고 수직확산도 거리에 따라 선형으로 증가하여 정상부근에서야 농도가 최고점에 도달하며 지표면 농도도 다른 모델에 비하여 낮다.

불안정 조건에서의 CTDMPLUS는 중심선을 중심으로 한 정규 분포가 아닌, 수직 방향으로 확률밀도함수를 이용한 비대칭 확산구조를 택하고 있다. 따라서 다른 모델에서와 같이 중심선과 확산계수를 표시하는 대신 수직농도분포를 살펴보았다. 굴뚝에서 배출된 오염물질이 지표면을 향하여 다가서는 모습을 볼 수 있으며 이러한 과정에서 어느 모델보다 가장 가까운 위치에서 가장 높은 최고 농도가 나타나고 있다. 농도가 상승한 후 급격히 감소하는 풍하방향의 농도 분포는 그림 3에서 중심선이 지표면에 영향을 미치는 CTDMPLUS 이외에 여타 모델들에 오히려 가까운데, 수직방향으로의 비대칭구조로 인하여 중심선이 지형에 인접하는 것과 같은 효과를 나타내기 때문으로 해석된다.

4.5 24시간 평균 최고 농도와 Valley 계산

Valley는 장기모델과 같이 기상자료가 풍향, 풍속, 대기안정도의 결합빈도함수로 입력되고, 매시간 평균농도가 아닌 24시간 평균농도를 산출한다. 따라서 표 8에서는 여타 모델들의 매시간 오염도의 24시간 평균 최고 농도를 Valley의 24시간 평균 최고 농도와 비교하였다. 표 6을 보면 불안정 보다 안정 조건의 최고 농도가 높으며, 이에 따라 24시간 평균 최고 농도도 대체로 표 6의 안정 조건에서 농도가 가장 높았던 43번 착지점에서 농도가 가장 높다. 오직 SHORTZ만이 약간 앞선 35번 착지점에서 농도가 가장 높다. 24시간 평균 최고 농도도 표 6의 안정 조건에서와 같이 SHORTZ, COMPLEX I, RTDM, CTDMPLUS 순으로 높다. Valley는 지점의 농도를

Table 8. Comparison of 24-hour average maximum concentrations and their occurrences.

Model	24-Hour Average Maximum Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Receptor (Elevation, m)
COMPLEX I	333	#43 (304.8)
RTDM	198	#43 (304.8)
SHORTZ	667	#35 (243.8)
CTDMPLUS	76	#43 (304.8)
VALLEY	10	800 ~ 1,600 m SSE ^a (537.1 ~ 621.5)

^a Receptor sector between 800 and 1,600 m in the SSE radial direction.

계산하는 대신 부채꼴 모양의 지점에 대한 평균 농도를 계산하므로 직접 비교가 곤란하나, 표 8의 지점에 대한 평균 농도는 모델에서 지정 가능한 지점들 중 최고 농도임에도 여타 모델 중 가장 낮은 CTDMPLUS보다도 월등 낮다.

5. 결 토

본 연구에서는 최근 정밀모델로서 발표된 CTDMPLUS를 중심으로 다른 모델의 계산결과를 비교하였다. 그러나 모델 예측의 정확성은 실제 오염도와 비교하여 평가되어야 함은 물론이다. 모델 예측을 실제 오염도와 비교하기 위하여서는 가우시안 모델 예측이 확률의 성격을 지니고 있음을 충분히 감안하여야 하고, 실제 측정에 있어서는 배경오염의 변화에 유의하여야 한다. Paumier 등(1992)은 CTDMPLUS를 평가하기 위하여 미국 뉴욕시 북쪽에 위치한 Lovett 화력발전소 배출 SO₂ 농도를 2.5 km 떨어진 330 m 산지에 배치된 10개의 측정소에서 1년간 측정하여 CTDMPLUS와 RTDM 계산 결과와 비교하였다. 안정된 대기에서 RTDM의 예측은 실제보다 8배 정도 높는데 비하여 CTDMPLUS의 예측은 약 2배 정도 높았다. 불안정한 대기조건에서 RTDM은 측정값보다 오히려 낮게 예측한 반면 CTDMPLUS의 예측은 측정값보다 약간 높았다. Paumier 등(1992)의 분석을 토대로 표 6의 결과를 다시 한번 살펴보면, 안정 조건일 때 COMPLEX I과 SHORTZ의 예측은 RTDM보다도 월등 높아 너무 보수적이며, 불안정 조건에서 SHORTZ의 예측은 너무 낮다.

서론에서도 언급하였지만 현재 복잡지형을 위한 가우시안 모델의 가장 큰 제약점은 지형 후면의 와류발생 등을 취급하기 위한 과정이 포함되어 있지

Table 9. One-hour average maximum concentrations and their occurrences predicted by INPUFF.

Stability	Maximum Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Receptor (Elevation, m)	Hour	Wind Speed (m/s)	Puff Height (m)
Stable	2,533	#43 (304.8)	0300	0.6	288.3
Unstable	116	#35 (243.8)	0600	1.1	856.7

않다는 점이다. 따라서 현재의 복잡지형 모델들은 우리나라에서 흔히 볼 수 있는 것과 같이 산이 중첩되어 있는 경우 계산결과를 유의하여 살펴보아야 한다. 복잡지형 모델들이 모두 플룸모델로써 연속적인 기상변화를 고려할 수 없다는 것도 큰 제약 중의 하나이다. 가장 많이 이용되는 퍼프모델의 하나인 INPUFF (Gaussian Integrated PUFF)는 퍼프 중심점보다 지형의 높이가 높아지면 중심점 높이로 착지점 높이를 잘라서 가정하는 ‘지형 절단(terrain chopping)’ 기법을 이용하고 있다 (Petersen and Lavdas, 1986).¹⁾ 표 9는 INPUFF를 이용하여 표 4의 기상조건에서 최고 농도를 계산한 결과이다. 안정 조건에서는 오전 3시에 퍼프 중심점보다 높은 착지점에서, 그러나 실제 계산에서는 퍼프 중심점 위치의 착지점에서 표 6의 COMPLEX I보다 높고, 불안정 조건에서는 오전 6시에 퍼프가 혼합고 위에 있음에도 전 시간까지의 안정 조건의 영향으로 최고 농도는 표 6의 RTDM보다 약간 높다.

6. 결 론

최근 정밀모델로써 발표된 CTDMPPLUS를 중심으로 미국 EPA 모델 지침서에서 추천하고 있는 복잡지형 모델들의 계산 결과와 과정을 비교하였다.

① 안정 조건에서 최고 농도 계산은 SHORTZ, COMPLEX I, RTDM, CTDMPPLUS 순으로 높았다. 이러한 차이는 연기의 중심선이 지형과 마주친 후 얼마만한 높이에서 지형을 따라 이동하느냐에 의하여 결정되었으며, 따라서 최고 농도는 연기의 중심선이 지형과 마주치는 부근의 착지점에서 발생하였고 연기의 높이가 크게 다르지 않은 상황에서 최고

농도 착지점의 위치도 거의 동일하였다. 그러나 SHORTZ와 COMPLEX I의 최고 농도 계산은, 실제 기상조건에 관계없이 착지점에서 가능한 절대 최고 농도를 계산한 CTSCREEN의 결과보다 높아 1차 분석으로써도 너무 높았다.

② 불안정 조건에서 최고 농도 계산은 CTDMPLUS, COMPLEX I, RTDM, SHORTZ 순으로 높았다. 불안정 조건에서는 연기상승의 높이가 높았고 이에 따라 풍하거리에 따른 수직 확산계수 변화가 지표면 농도결정에 중요하였다. 수직 확산계수가 빨리 커질수록 오염원으로부터 가까운 곳에서 더 높은 최고 농도가 나타났다. Paumier 등(1992)이 실제 측정과 비교한 결과에 의하면 CTDMPLUS는 다소 높고 RTDM은 낮았으며, 이에 의하면 최소한 SHORTZ의 계산은 너무 낮았다.

③ CTDMPLUS의 최고 농도 계산은 안정과 불안정 조건 사이에 큰 차이가 없었다. 안정 조건 계산에서는 연기의 중심선 이외에 상승 부분의 중심점 위치가 중요하였고, 우회 부분의 기여도도 확인할 수 있었다. 연기 상승고도가 높은 불안정 조건의 계산에서는 지균풍의 영향에 의한 연기 상승 높이에서의 풍향 변화로 수평 농도 분포의 중심축이 기상 측정위치의 풍향으로부터 이동되는 현상이 관찰되었으며, 연기가 자연스럽게 지형을 타고 이동함에 따라 전체적인 농도분포가 정상적인 가우시안 분포와 크게 다르지 않았다.

④ 본 연구의 실험 조건에서는 안정 조건의 최고 농도가 불안정 조건보다 높았다. 이에 따라 24시간 평균 최고 농도 순위는 안정 조건과 같이 SHORTZ가 가장 높고 CTDMPLUS가 가장 낮았으나 Valley의 계산 결과는 CTDMPLUS보다도 낮았다.

본 연구에서는 CTDMPLUS가 필요로 하는 입력 자료가 가능한 경우를 모의 실험조건으로 설정하였으므로 다른 모델과의 비교에 무리가 없었다. 그러나 만일 다른 모델의 계산 결과를 검토하기 위하여 CTDMPLUS를 이용하고자 하였다면 너무 방대한 자료가 추가로 요구되어 상황이 전혀 달라졌을 수 있다. 이와 같은 경우 앞에서 살펴본 바와 같이 CTSCREEN은 CTDMPLUS의 계산방식을 그대로

¹⁾ 참고문헌으로 Petersen과 Lavdas(1986)를 인용하였으나 실제 INPUFF의 지침서에서는 복잡 지형 처리에 대한 내용을 발견할 수 없었으며, 본문의 내용은 source code에서 확인하였음.

채택하고 있다는 점에서 매우 유용한 대체 수단이 될 수 있다. 복잡지형을 포함한 주변 지역에 대한 오염원의 영향을 보다 정확하게 알아보기 위하여 CTDMPLUS를 이용하고자 할 때도 상황은 동일하다. 지형 전면의 농도계산에는 CTDMPLUS가 정확할 가능성이 높지만 방대한 자료에 비하여 지형 후면의 변화에 대하여 유효한 정보를 줄 수 없다는 점에서도 CTDMPLUS의 이용에 신중할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 유독물질 누출 사고가 복잡 지형을 포함한 인근 지역에 미치는 영향을 조사하기 위하여 과학기술처 국책사업인 방재기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다. 연구비를 지원하여 주신 관계자분들께 감사드립니다.

참고 문헌

김선태, 홍현수, 김학민 (1997) CTDMPLUS Model을 이용한 악취확산 평가, 한국대기보전학회 춘계학술대회 요지집, pp.85-86.

김영성, 경남호 (1995) 복잡한 지형내 오염물질의 대기확산 풍동실험. II. 산지지형 실험의 Gaussian 모델링, 한국대기보전학회지, 11(2), 145-152.

나진균 (1990) 복잡한 지형에서의 대기오염 확산 모델에 관한 연구, 박사학위 논문, 인하대학교 응용물리학과.

오현선, 김영성, 김진영, 문길주, 홍옥희 (1998) 보령화력 지역의 복잡지형이 대기확산 모델링에 미치는 영향 비교, 한국대기보전학회지, 13(6), 427-437.

장영기, 김동영, 전의찬 (1996) 지형고려 가우시안 대기확산 모형의 감응도 분석, 한국대기보전학회 추계 학술대회 요지집, pp.18-20.

최일경, 전의찬, 김정옥 (1990) 지형을 고려한 단기 대기확산모형의 평가에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 6(2), 125-134.

Bjorklund, J.R. and J.F. Bowers (1982) User's Instructions for the SHORTZ and LONGZ Computer Program - Volume I, EPA-903/9-82-004a, Environmental Protection Agency, Region III, Philadelphia, PA.

Burt, E.W. (1977) Valley Model User's Guide, EPA-450/2-77-018, Environmental Protection Agency, Rese-

arch Triangle Park, N.C.

Cramer, H.E., H.V. Geary, and J.F. Bowers (1975) Diffusion-model Calculations of Long-term and Short-term Ground-level SO₂ Concentrations in Allegheny County, Pennsylvania, EPA-903/9-75-018, Environmental Protection Agency, Region III, Philadelphia, PA.

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.

Paumier, J.O., S.G. Perry, and D.J. Burns (1992) CTDMPLUS: A dispersion model for sources near complex topography. Part II: Performance characteristics, J. Appl. Meteor., 31, 646-660.

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 1. Model Description and User Instructions*, EPA-600/8-89-041, Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, N.C.

Pierce, T.E. and D.B. Turner (1980) *User's Guide for MPTER - A Multiple Point Gaussian Dispersion Algorithm with Optional Terrain Adjustment*, EPA-600/8-80-016, Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, N.C.

Tennekes, H. (1981) Similarity relations scaling laws and spectral dynamics, In *Atmospheric Turbulence and Air Pollution Modeling*, Edited by F. T. M. Nieuwstadt and H. van Dop, D. Reidel Publishing Co., Boston, MA.

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 (1992) *User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC2) Dispersion Models: Volume II - Description of Model Algorithms*, EPA-450/4-92-008b, Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, N.C.