

燒却爐 排出가스의 大氣汚染 豫測 및 制御를 위한 分散모델링 방법론

송덕만 · 김영태 · 김태용* · 최청정 · 문희순
화학공학과 · 이수화학공업(주)*

<요 약>

본 연구의 목적은 공단지역의 대형 폐기물 소각로에서 배출되는 다양한 대기오염물의 기상 및 지형조건의 변화에 따른 지표면 착지농도를 예측하고 대기오염물의 대기중 이동 및 분산유형을 고찰하여 대기질 영향을 예측·평가하는 방법론을 개발함으로써 대기오염 저감을 위한 관리방안을 수립하기 위한 것이다.

울산의 실제 기상자료와 오염배출량 및 굴뚝특성자료를 ISCST 분산모델에 입력하여 소각로에서 배출되는 대기오염물질들의 대기질에 미치는 영향을 예측하고, 배출허용기준 및 설계기준에 따른 소각로의 굴뚝특성을 변화시키면서 대기오염저감 관리방안을 고찰하였다.

본 연구에서는 굴뚝배출특성을 변화시키면서 대기질 저감을 위한 최적의 굴뚝설계에 대한 분산모델링 방법론을 개발하였으며, 본 모델링 방법론은 공단에서 배출된 대기오염물질들의 제어 및 예측을 위해 저감대책을 위한 전략수립시 예비지침서로 사용될 수 있을 것이다.

Dispersion Modeling Methodology for Air Pollution Prediction and Control of Incinerator Gas Emissions

D.M.Song · Y.T.Kim · T.Y.Kim* · C.J.Choi · H.S.Moon
Dept. of Chemical Engineering · Isu Chemical Co., Ltd.*

<Abstract>

The objective of this study is to predict the ground-level concentration of various air pollutants emitted at a large-scale waste incinerator in industrial complex sites,

varying with meteorological and topographical conditions, and to consider transport and dispersion patterns in air of pollutants, and finally to establish the management strategy for air pollution reduction by developing a methodology for predicting and estimating the effects of air quality.

By incorporating the actual meteorological data, source emissions and stack characteristics into the ISCST dispersion model, this study predicted the effects of air pollutants emitted at the incinerator on air quality, and considered the management strategy for air pollution reduction varying with stack characteristics of the incinerator.

This study developed the dispersion modeling methodology on optimal stack design for reduction of air quality by varying stack characteristics, and this modeling methodology can be used as a preliminary guideline in establishing the reduction management strategy for control and prediction of air pollutants at industrial complex sites.

1. INTRODUCTION

대기오염관리를 위해서는 오염배출원(emission source)의 규명, 오염현황(pollution status)의 파악, 오염관리기준(management standard)의 설정, 오염방지 및 저감기술(prevention and reduction technology)의 개발 등 많은 자료와 기술이 필요하다. 또한, 대기오염을 체계적이며 종합적으로 관리하기 위해서는 대기오염물질의 배출량(emission rate)과 대기질(air quality)의 관계를 규명할 수 있는 방법론을 개발하는 것은 필수적인 단계이다.

본 연구의 목적은 대기오염 배출원이 밀집되어 있는 울산 및 온산공단 인근 지역에 대형 폐기물 소각로를 설치하는 경우, 소각로 배출원에서 배출되는 다양한 대기오염물질의 기상 및 지형조건에 따른 지표면 착지농도를 정량적으로 예측하고, 대기오염물질의 대기중 이동 및 분산유형을 고찰하여 대기질 영향을 예측하고 평가하는 방법론을 개발함으로써 대기오염저감 관리방안을 수립하기 위한 것이다.

본 연구에서는 지형, 기후, 연구대상, 오염물질의 종류 등을 고려할 때 생산시설이 밀집되어 있는 울산 및 온산공단 배출

오염물질의 정량적 해석에 적합하리라고 판단되는 미 환경보호국(USEPA)에서 인정하고 있는 Gaussian Plume Model인 ISCST(Industrial Source Complex Short Term) Dispersion Model에 울산의 실제 기상자료(meteorological data)와 오염배출량(source emissions) 및 굴뚝특성(source characteristics) 자료를 입력하여 분산모델링을 수행하였다. 그 결과 소각로 배출원에서 발생하는 대기오염물질들의 대기질에 미치는 영향을 예측하고, 오염저감대책의 일환으로 배출허용기준(allowable emission standard) 및 설계기준(design standard)에 따른 소각로의 굴뚝특성을 변화시키면서 오염저감 관리방안을 고찰하였다.

2. AIR DISPERSION MODELING METHODOLOGY

본 연구에서는 대기오염물질의 지표면 농도를 예측하고 대기오염물질의 대기중 분산 및 확산현황을 파악하기 위해 미국 기술정보국(NTIS)에서 국내외 사용자를 위

해 보급배포하고 있는 UNAMAP(User's Network for Applied Modeling of Air Pollution) System의 하나인 ISCST (Industrial Source Complex Short Term) Dispersion Model의 PC용 UNAMAP Version 6 모델(미국, Trinity Consultant Co.)인 BREEZE AIR 소프트웨어 프로그램 (ISCST 6576 분산모델)을 사용하였다.

Gaussian plume model식에 근거한 가정들을 체계적으로 설정하고 실제 과거의 기상조건들을 분석하여 대기오염물의 배출량 및 기상자료들을 ISCST Dispersion Model에 입력하여 분산모델링을 수행함으로써 대기오염물질의 풍하거리에 따른 착지점(receptor)에서의 지표면 농도를 예측하였다. 대기분산모델링에 사용된 입력자료의 항목별 개요는 다음과 같다.

(1) 오염배출원 자료 (Source Data)

오염배출원인 본 소각로를 점오염원(point source)으로 선정하여 굴뚝의 높이, 내경,

배출속도, 배출가스 온도, 굴뚝 배출량 등의 굴뚝특성(stack characteristics) 자료와 building & aerodynamic wake effect를 고려하여 stack에 인접한 건물의 높이, 길이 및 폭 등의 구조물 특성(structure characteristics)자료를 사용하여 point source modeling을 수행하였다. 모델링에 사용한 소각로의 굴뚝설계특성은 다음의 <Table 1>에 나타내었다.

소각로 배출가스들의 배출량은 소각로의 설계사양 및 종류에 따라 대기오염물의 배출량이 매우 가변성을 띄고 있으므로 이와같이 가변성, 다양성에 따른 방대한 자료를 구하기는 어려운 실정으므로, 주위 인근지역에 영향을 미치지 않으면서 대기환경보전법상 배출허용기준을 만족하도록 산출하여 설정하였다. 설계기준의 배출량은 배출허용기준보다 약 50% 정도 작게 선정하여 각 배출가스들의 배출량을 산출하여 모델링 수행시 입력자료로 사용하였다.

<Table 1> Incinerator Design Criteria

Design Variables		Emission Standard		Design Basis	
Stack Characteristics	배출가스의 유량			Q = 130,000 m ³ /hr	
	배출가스의 온도			T _s = 200 °C	
	유효굴뚝높이			H = 70 m	
	배출가스속도			v _s = 6 m/sec	
	굴뚝의 직경			d _s = 2.8 m	
Gas Emissions	SO ₂	300 ppm	130 ppm	Q _{SO2} = 7.74 (g/sec)	
	NO ₂	200 ppm	150 ppm	Q _{NO2} = 6.98 (g/sec)	
	CO	600 ppm	100 ppm	Q _{CO} = 2.60 (g/sec)	
	TSP	80 mg/m ³	20 mg/m ³	Q _{TSP} = 0.722 (g/sec)	

* 배출허용기준에 근거한 배출량 산정 : Q_{SO2} = 18.0 (g/sec)

본 소각로의 설계조건으로부터 대기오염 저감의 일환으로 관리방안 수립을 위

한 대안설정은 <Table 2>와 같이 설정되었다.

<Table 2> Incinerator Design Criteria and Control Management Practices

Design Variables		Emission Standard	Design Basis	Control Management Practices		
Stack Characteristics	가스량		Q = 130,000 m ³ /hr			
	가스온도		T _s = 200 °C	100 °C	300 °C	400 °C
	굴뚝높이		H = 70 m	50 m	100 m	150 m
	가스속도		v _s = 6 m/sec	5.3 m/s	6.6 m/s	7.4 m/s
	굴뚝직경		d _s = 2.8 m			
Gas Emissions	SO ₂	300 ppm	130 ppm	Q _{SO2} = 7.74 (g/sec)		
	NO ₂	200 ppm	150 ppm	Q _{NO2} = 6.98 (g/sec)		
	CO	600 ppm	100 ppm	Q _{CO} = 2.60 (g/sec)		
	TSP	80 mg/m ³	20 mg/m ³	Q _{TSP} = 0.722 (g/sec)		

(2) 기상 자료 (Meteorological Data)

기상 입력자료는 풍향(wind direction), 풍속(wind speed), 대기의 온도(ambient air temperature), 대기안정도(air stability category), 최대혼합높이(maximum mixing height), 풍속지수(wind profile exponent), 연직온도구배(vertical potential temperature gradient) 등을 포함한다.

풍향구분은 22.5° 간격으로 16등분한 풍향 sector를 사용하였으며, 풍속의 고도에 따른 변화는 Deacon's Power Law에 따

라 산출되었으며, 월별/계절별/년별로 풍향 및 풍속을 비교분석하여 바람장미(wind rose)도를 작성하여 고찰하였다.

특히 기상 입력자료중 대기안정도는 Pasquill-Gifford의 Stability Category에 따라 주간에는 일사량과 풍속, 야간에는 운량과 풍속을 이용하여 Turner's Method에 의하여 산출하였다. 울산측후소의 기상자료를 최대한 활용하여 본 연구에서 시도한 새로운 범주의 대기안정도 산출근거는 다음의 <Table 3>에 나타내었다.

<Table 3> Stability Classifications

Day			Night	
Solar Insolation			Cloudiness	
Strong	Moderate	Slight	Cloudy (≥4/8)	Clear (≤3/8)
A(u≤2.5)	A(u ≤ 2.0)	B(u≤2.0)	E(u≤3.0)	F(u≤3.0)
B(2.5 <u≤5.0)	B(2.0 <u≤4.0)	C(2.0≤u≤5.0)	D(3.0 <u)	E(3.0 <u≤5.0)
C(5.0 <u)	C(4.0 <u≤5.5)	D(5.0 <u)	-	D(5.0 <u)
-	D(5.5 <u)	-	-	

u: surface wind speed (m/s)

또한, 최대혼합높이는 최근 13년동안의 울산의 월별/계절별/년별 혼합높이를 비교 검토한 결과 약 1000m 정도의 값을 보이고 있어 기상입력자료의 최대혼합높이값은 일괄적으로 1000m를 대표값으로 선정하여 모델링을 수행하였다.

1981-1993년까지의 13년 동안의 울산측 후소 및 기상청의 매시 관측된 기상월보 및 기상연보를 조사분석하여 1993년의 기상자료를 대표값으로 선정하여 모델링을 수행하였다.

(3) 착지점 격자 자료(Receptor Grid Data)

분산모델링의 착지점 격자 배열(grid array)은 극좌표(r, θ)나 직교좌표(X,Y)를 동시에 이용하였으며, 극좌표배열의 경우에는 소각로로부터 250m에서 5000m까지 500m 등간격으로 동심원을 설정하여 각 ring당 16 radial 방향(22.5° 간격, wind direction)으로 15개의 radial ring을 사용하여 소각로로부터 receptor 위치 240개 지점을 선정하였으며, 직교좌표의 경우에는 배출원 인근에 receptor 위치를 Universal Transverse Mercator(UTM) 좌표계에 의하여 X좌표를 East-west(동서)로, Y좌표를 North-south(남북)로 10개 지점을 선정하여 총 250개 지점의 착지점에 대하여 분산모델링을 수행하였다.

(4) 프로그램 제어인자
(Program Control Parameters)

프로그램의 제어인자들에서 소각로 배출 대기오염물질 중 가스상물질인 SO_2 , NO_2 및 CO의 농도는 highest and second highest 24-hr average concentration option을, 입자상물질인 분진(total suspended particulate; TSP)의 농도는 highest and second highest 24-hr average deposition option을 선택하였으며, 공회 rural mode option을 선택하였다.

특히, 분진의 deposition 농도를 산출하는데는 particle size에 따른 mass fraction, settling velocity, reflection coefficient 등이 고려되었으며 각 값들은 ISCST 모델을 위한 USEPA의 default option에 근거하여 선택되었다.

Receptor terrain elevation option은 상승지형에 대한 지형(topography)자료의 불충분으로 인하여 설정하지 못하였으므로 flat terrain으로 가정하였다. Wind-profile exponent option과 vertical potential temperature gradient option은 Pasquill-Gifford stability에 근거하여 USEPA의 법규제정을 위해 규정되는 default option을 이용하였으며, 또한 plume rise option 및 stack-tip downwash option 또한 USEPA의 default option에 근거하여 선택되었다.

3. RESULTS AND DISCUSSION

<Table 1>의 소각로 설계기준에 근거한 굴뚝특성자료들과 소각로 배출가스 SO_2 , NO_2 , CO 및 TSP의 배출허용기준에 근거한 설계기준 배출량을 ISCST dispersion model에 입력시켜 각각의 대기오염물질에 대하여 모델링을 수행한 결과를 정리하여 풍하거리에 따른 계절별 24-hr average 최대 지표면 농도를 <Table 4>에 나타내었다.

<Table 4> 풍하거리에 따른 계절별 24-hr Average 최대 지표면 농도

Air Pollutants	Air Quality Standard	Seasonal 24-hr Average Conc./ Receptor Point							
		Winter		Spring		Summer		Fall	
SO ₂ (ppm)	년평균	0.00634		0.00661		0.00677		0.00666	
	0.03 ppm	750m	360°	750m	315°	750m	157.5°	750m	315°
NO ₂ (ppm)	년평균	0.00832		0.00867		0.00888		0.00875	
	0.05 ppm	750m	360°	750m	315°	750m	157.5°	750m	315°
CO (ppm)	월평균	0.00485		0.00506		0.00518		0.00510	
	8 ppm	750m	360°	750m	315°	750m	157.5°	750m	315°
TSP(μg/m ³)	년평균	0.18020		0.22174		0.17922		0.19613	
	150 μg/m ³	750m	360°	750m	315°	750m	157.5°	750m	315°

<Table 4>에 나타난 바와 같이 SO₂, NO₂ 및 CO의 년중 최대 지표면 농도는 계절별로는 공히 여름계절 동안에 각각 0.00677, 0.00888 및 0.00518 ppm으로 나타났으며, 대기질 환경기준치에 비교할 때 각각 22.5%, 17.8% 및 0.06% 수준으로 나타났다. SO₂, NO₂ 및 CO의 년중 최대 지표면 농도가 나타나는 지점은 공히 사계절에 걸쳐 소각로 중심에서 동심원으로 반경 750 m 지점에서, 각각 360° (N), 315° (NW), 157.5° (SSE), 315° (NW) 방향으로 나타나고 있어 예측 결과는 울산 지역의 주풍향이 북풍(N) 및 북북서풍(NNW) 계열이라는 점과 일치함을 보이고 있다.

한편, TSP의 년중 최대 지표면 deposit ion농도는 봄계절에 0.22174 μg/m³으로, 대기질 환경규제기준치의 0.15% 수준으로 나타나고 있다. TSP의 최대 지표면 농도가 나타나는 지점은 SO₂, CO 및 NO₂의 예측결과와는 달리 겨울, 봄 및 가을에는 소각로 중심에서 공히 동심원으로 반경 500m 지점에서, 여름에는 반경 750 m 지점에서 발생하고 있으며, 각각 360°, 315°, 157.5°, 315° 방향으로 나타나고 있어 예측결과는 위의 가스상 대기오염물질들의 예측결과와 같이 울산지역의 주풍향이 북풍 및 북북서풍 계열이라는 점과 일치함을 보이고 있다.

<Table 1>의 design basis에 근거한 굴뚝특성자료와 배출가스 SO₂의 배출허용

기준 배출량(Q_{SO2} = 18.0 g/sec) 및 설계 기준 배출량(Q_{SO2} = 7.74 g/sec) 각각에 대해 모델링을 수행한 결과인 풍하거리에 따른 계절별 일평균 최대 지표면 SO₂ 농도들을 각각 비교하여 <Figure 1>에 나타내었다.

<Table 2>의 control management practices에 근거하여 굴뚝특성을 변화시켜 주면서 각 대기오염물질들에 대하여 모델링을 수행하였으며, control management strategy 수립방안을 위하여 굴뚝특성인 유효굴뚝높이의 변화, 굴뚝가스 온도의 변화, 굴뚝배출속도의 변화에 따른 배출가스 SO₂의 풍하거리에 따른 계절별 일평균 최대 지표면 농도는 <Figure 2-1>에서 <Figure 2-3>까지에 나타내었다.

또한, 소각로 배출가스중 NO₂, CO 및 TSP의 대기오염 영향을 예측하기 위하여, 각 가스들에 대한 <Table 1>의 design basis 및 <Table 2>의 control management practices에 근거한 굴뚝특성자료들과 NO₂, CO 및 TSP의 설계기준 배출량(Q_{NO2} = 6.98 g/sec ; Q_{CO} = 2.60 g/sec ; Q_{TSP} = 0.722 g/sec)을 입력하여 각각에 대해 모델링을 수행하여 풍하거리에 따른 계절별 일평균 최대 지표면 NO₂, CO 및 TSP의 농도를 예측하였으며, NO₂ 및 CO의 농도 결과는 <Figure 3>과 <Figure 4>에 나타내었다.

<Table 2>의 Control Management Practices에 근거하여 모델링을 수행한 결

과, 소각로의 유효굴뚝높이를 설계조건 70m에서 50, 100, 150m로 변화시켰을 때의 SO₂ 최대농도(ppm)의 변화를 살펴보면, 유효굴뚝높이 50m, 100m, 150m에서의 SO₂의 최대 지표면농도는 각각 0.00863, 0.00593 및 0.00464 ppm으로 나타났으며, 100m와 150m으로 상승시킨 경우에는 각각 대기질 환경규제기준치의 19.8%, 15.5% 수준으로 감소효과를 보였다.

소각로의 배출가스 온도를 설계조건 200℃에서 100℃, 300℃, 400℃로 변화시켰을 때의 SO₂의 최대 지표면농도(ppm)의 변화를 살펴보면, 배출가스의 온도 100℃, 300℃, 400℃에서의 SO₂의 최대 지표면농도는 0.01045, 0.00562, 0.00513 ppm이며, 300℃ 및 400℃로 상승시킨 경우에는 각각 대기질 환경규제기준치의 18.7%, 17.1% 수준으로 현저한 감소효과를 보였다.

소각로의 배출가스 속도를 설계조건 6 m/sec에서 5.3, 6.6, 7.4 m/sec로 변화시켰을 때의 SO₂의 최대 지표면농도(ppm)의 변화를 살펴보면, 배출가스의 속도 5.3 m/sec, 6.6 m/sec, 7.4 m/sec에서의 SO₂의 최대 지표면농도는 0.00743, 0.00631, 0.00573 ppm이며, 6.6 m/sec 및 7.4 m/sec로 상승시킨 경우에는 각각 대기질 환경규제기준치의 21.0%, 19.1% 수준으로 약간의 감소효과를 보였다.

한편, 기상변화에 따른 SO₂, NO₂, CO 및 TSP의 등농도곡선을 작성하여 대기오염물질의 분산유형을 고찰하였으며, SO₂, NO₂ 및 CO의 농도는 여름철에 최대치를 보이고 있어 여름철을 대표계절로 선정하여 SO₂ 및 TSP의 등농도곡선을 <Figure 5>와 <Figure 6>에 나타내었다.

4. CONCLUSION

(1) 대기오염물질의 기상변화에 따른 분산유형

모델링의 예측결과로부터 대기오염물질의

최대 지표면농도는 겨울, 봄, 여름 및 가을계절에 각각 360°(N), 315°(NW), 157.5°(SSE), 315°(NW) 방향에서 나타나고 있어, 기상변화에 따른 대기오염물질의 분산, 확산유형은 울산지역의 주풍향이 북풍(N) 및 북북서풍(NNW) 계열이라는 점과 일치하고 있다.

(2) 설계기준에 따른 대기오염의 영향

소각로 설계조건은 대기환경보전법상 배출허용기준을 만족하면서 인근지역 주민에 영향을 미치지 않도록 설정되었다. 설계조건에 따른 CO나 TSP의 단기적·장기적인 대기오염영향은 극히 미미하나, SO₂ 및 NO₂의 경우에는 최대 지표면농도가 각각 0.00677 및 0.00888 ppm으로 대기질 환경기준치(0.05 ppm)의 22.6%, 17.8% 수준으로 나타나고 있어 단기적인 대기오염 영향은 비교적 크지 않다 하더라도 장기적으로는 대기질에 영향을 미칠 수 있다고 예측된다.

(3) Control Management Practices에 의한 대안 설정

굴뚝의 높이를 150m로 높이고, 굴뚝 배출가스의 온도를 400℃로 올리고, 굴뚝 배출가스의 속도를 7.4 m/sec로 빠르게 하는 경우에 가장 높은 저감효과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나 이와 같은 굴뚝특성 변화에 따른 대안 설정은 현실성, 경제성과도 연관하므로 면밀한 경제성 검토와 아울러 적절한 대안 설정이 이루어져야 할 것이다.

(4) Optimal Control Management Strategy의 수립

SO₂ 및 NO₂의 단기적인 대기오염 영향은 비교적 크지 않다 하더라도 장기적으로는 대기질에 영향을 미칠 수 있다고 예측된다. 따라서 본 소각로 배출가스중 SO₂

및 NO₂의 제어시설을 보다 엄격히 선정하여 설치하고 소각설비의 건설단계와 운영 단계에서 세심한 운영관리계획 하에 이를 엄격히 시행함으로써 SO₂ 및 NO₂에 의한 인근지역에 미치는 대기오염영향을 극소화할 필요가 있다고 사료된다.

소각로를 설치하는 경우에는 소각로 운전미숙, 오염방지설비의 고장, 방지효율의 저하 등으로 인하여 장차 대기질에 일시적 및 계속적으로 미칠 수 있는 대기질 영향을 고려하고, 향후 더욱 강화될 대기환경보전법상 배출허용기준에 능동적으로 대처하면서 인근지역 주민에 미치는 영향을 최소화하기 위해서는 굴뚝특성의 변화들을 조합한 경제성 검토와 아울러 시행 가능한 행정적, 기술적 대기오염 저감대책을 검토하여 optimal control management strategy를 수립하여야 할 것이다.

(5) 기상입력 자료의 보완과 분산모델링의 수정

분산모델링 입력자료에서 최대혼합높이는 일괄적으로 1000 m(울산지방의 평균치)을 사용하였으므로 최대혼합높이가 시간별로 변하는 실제의 기상조건과는 달라 예측농도가 달라질 수가 있다. 결국, 이러한 기상입력 자료중 실제 최대혼합높이의 보완이 필요하므로, 향후의 연구에서는 울산지방의 일별 최고, 최저기온과 인근 포항측후소의 09시 및 21시 연직 sounding을 이용하여 역전층(inversion layer)의 출현빈도 및 출현고도를 고려한 최대혼합높이(maximum mixing depth; MMD)를 산출하여 ISCST 모델에 입력시켜 분산모델링을 수행함으로써 보다 정확한 대기오염 영향을 예측할 수 있으리라 사료된다.

REFERENCES

1. Bowers, J.F., Bjorklund, J.R., and Cheney, C.S. : "Industrial Source Complex(ISC) Dispersion Model User's Guide", EPA-450/4-79-030 (Vol. I) & EPA-450/4-79-031 (Vol. II), USEPA, Research Triangle Park, North Carolina, Dec. (1979)
2. Turner, T.B. : "Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates", Office of Air Programs Publication No. AP-26, USEPA, Research Triangle Park, North Carolina (1970).
3. 기상청 : 1981년~1993년 월표원부, 1981년~1993년 기상월보, 1981년~1993년 기상연보 (1981~1993).
4. Wackerman, T., Kandler, G., O'Brien, J., Kummler, R., Song, D., and Warner, P. : "Odor Prediction and Control Study-Ann Arbor Sanitary Landfill", Applied Science and Technology Inc., Vol. I-III, 1-1 ~ 6-72, March (1989).
5. Song, D.M. : "Odor Modeling Methodology for Determining the Odor Buffer Distance for Sanitary Landfills", Ph. D. Dissertation, Wayne State University, Detroit, MI, May (1991).