

하절기 천안 제 2산업단지의 대기오염확산 및 악취물질에 관한 연구

정진도[†] · 홍정희 · 김수영* · 김정태 · 최소진

호서대학교 환경공학과 · *서울벤처정보대학원대학교

(2006년 9월 3일 접수, 2006년 12월 18일 채택)

Dispersion of Air Pollutants Dispersion and Odorous Materials in Cheon-an Second Industrial Complex

Jin-Do Chung[†] · Jeng-Hee Hong · Su-Young Kim* · Jung-Tae Kim · So-Jin Choi

Department of Environmental Engineering, Hoseo University, *Seoul University of Venture & Information

ABSTRACT : The purpose of this study is to analyze the pattern distribution of the odorous compounds and air pollutants from the inventory sources in the Cheon-an second industrial complex. Twelve analysis including specified odor materials and air pollutants were concurrently measured during the month of August, 2005 to evaluate odor emission characterization in major treatment facilities. Also, Concentration of air pollutants has been calculated by ISCST3 in ISC3 models. A Korean air diffusion modeling software, Air Master, was developed on a basis of diffusion theories adopted in U.S. EPA's ISC3 model to assess the air quality impact from the stacks. This investigation will be executed how large the complex pollutant sources such as industrial complex contribute to atmospheric environment and air quality of the surrounding the area as predicting by comparing and analyzing results of odorous compounds and air pollutants diffusion concentration model.

Key Words : Air Pollutants Dispersion, Odors, Odorous Concentration of Industrial Complex

요약 : 본 연구는 천안 제 2산업단지에서 배출되는 대기오염물질과 악취물질을 분석하고 대기오염물질의 확산모델링을 수행하고자 함을 목적으로 한다. 측정은 12가지 지정 악취물질과 대기오염물질의 농도에 대하여 2005년 8월에 수행하였다. 악취물질은 주요 배출원을 중심으로 부지경계선에서 측정 및 분석을 실시하였으며, 대기오염물질은 ISCST3모델을 이용하여 대기오염확산 농도를 계산하였다. Air Master는 현재 국내 대기환경영향평가에 많이 사용되고 있고 U.S. EPA의 추천모델인 ISC3모델 중 ISCST3모델을 사용하였다. 따라서 천안 제 2산업단지를 대상으로 하절기 대기오염물질을 측정하여 모델링 하고 악취물질은 시료채취 후 분석을 실시하여 주변 지역에 영향을 끼치는 대기오염물질과 악취발생물질의 종류와 발생 원인을 규명하고자 한다.

주제어 : 대기오염물질, 악취, 산업단지 악취물질

1. 서론

국토가 좁은 우리나라는 공업지역과 주거지역이 혼재되어 있어 공업지역에서 발생하는 대기오염 물질 및 악취로 인한 민원의 발생이 급증하고 있다. 특히 산업단지의 경우 다수의 기업이 일정 공간 안에 밀집되어 있어, 생산 활동에 따른 대기오염물질 및 악취물질의 배출이 인접한 주거지역의 대기질에 미치는 파급효과가 아주 클 것으로 예측된다.^{1~3)}

천안 제 2산업단지의 지형은 산업단지를 중심으로 외곽지역이 주거지역 및 녹지, 대규모 사업장, 산지 등이 인접하고 있는 복잡지형⁴⁾으로 인위적인 구릉지 형태를 하고 있다. 이로 인해 대기오염물질 및 악취물질이 밖으로 배출되지 못하고 산업단지 내에 정체될 가능성이 크며, 날씨가 덥고 습한

하절기의 경우 분자운동이 활발해지면서 용해도가 좋은 대기오염물질 및 악취물질의 농도가 높아질 것으로 예상된다. 따라서 산업단지 내 대기질의 현황을 알아보기 위해 대기자동 측정차량을 이용하여 일산화탄소(CO), 이산화질소(NO₂), 이산화황(SO₂), 미세먼지(PM₁₀)를 측정하였고, 악취물질은 악취공정시험법⁵⁾에 따라 복합악취 및 암모니아, 황화합물, 카르보닐 화합물, 아민류, 탄화수소류 등 12가지 지정악취물질에 대해 시료채취 및 분석을 실시하였다. 또한, 단기간 내 주변 지역에 대기오염물질이 미치는 영향을 알아보기 위해 Industrial Source Complex Short Term 3(ISCST3)모델을 이용하여 수행하였다.^{6~8)} 일반적으로 그 특성에 맞는 정확한 모델을 선정하기 위해서는 적용지역의 지리학적 특성과 측정오염물질의 종류, 배출량, 기상 및 지형자료 등을 충분히 파악하여야 한다.^{9~13)} 기상자료는 2004년 천안기상관측소의 시간평균자료를 이용하였고 지형자료는 국토지리정보원에서 제공하는 1:25000 지형도를 사용하였으며 배출량 자료는 2004년 충남도청에 구축된 대기오염물질의 연평균 배출량 DB를 이

[†] Corresponding author
E-mail: jdchung@office.hoseo.ac.kr
Tel: 041-548-3521 Fax: 041-540-5748

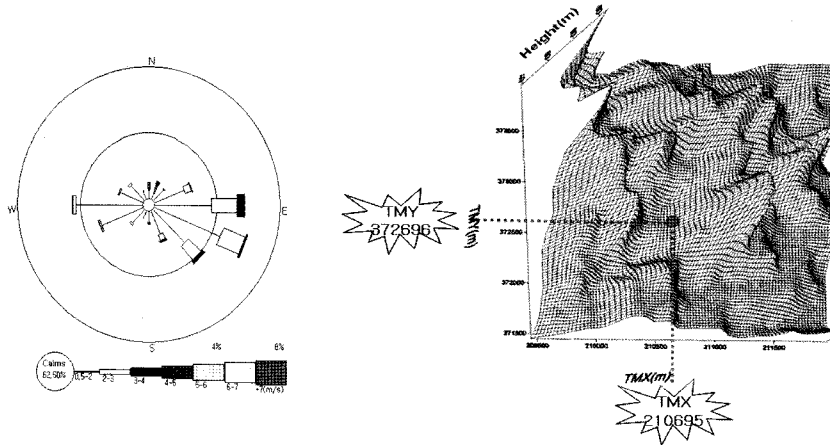


Fig. 1. Windrose and distribution of space in modeling area at cheon-an.

용하였다.

본 연구에서는 천안 제 2산업단지를 중심으로 대기오염물질과 악취물질에 대해 측정 및 분석을 실시하고 기상 및 지형, 배출량 자료를 이용하여 대기오염물질에 대한 대기확산 모델링을 수행하여 주변지역에 미치는 원인물질과 그에 따른 영향에 대해 분석하였다.

2. 분석자료

2.1. ISC모델

대기질의 효과적인 관리를 위해서는 대기 중에 방출되는 오염물질이 환경에 미치는 영향을 정확히 예측하는 것은 매우 중요하다.¹⁴⁾ 따라서 본 연구에서는 대기오염물질의 영향 범위를 파악하기 위해 현재 환경부에서 인정하는 ISC3모델 중 ISCST3모델을 적용하였다. ISCST3모델은 수 시간에서 수일의 단기간 중 기상변화에 따른 대기질 예측을 할 수 있고 인체유해 및 대기오염물질 배출사고 등에 의한 단 시간 내의 대기질변화도 묘사가 가능하기 때문에 본 연구에 적합하다 판단되어 사용하였다.^{6~8)}

모델링 시 필요한 지형자료는 국토지리정보원에서 제공하는 1:25000 지형도를 이용하여 TM(Transverse Mercator)좌표계에 따라 사업지구를 중심으로 2.5 km × 2.5 km지역을 21×21개의 수용점 격자로 분할하여 주위지형의 높이를 고려한 복잡 지형으로 고도를 계산하였다. 또한, 기상자료는 2004년 하절기 천안기상관측소의 평균 시간자료를 입력하였으며, 배출량은 충남도청의 자료를 토대로 각 오염물질에 대한 확산 모델링을 수행하였다.

2.2. 기상 자료

대기질 예측에 있어 기상자료의 중요성을 반영하기 위해 대기환경영향평가기법에서는 기상자료의 이용을 다음과 같이 규정하고 있다. 기상자료는 현지조사에서 얻어진 약 1년간에 걸친 풍향 풍속, 대기안정도(일사량, 수직온도분포, 복사수지량, 지상풍속으로 구해짐) 등의 자료를 이용하여 풍향별,

풍속계급별 대기안정도의 출현빈도를 구한다. 또한, 기상관측소나 지방자치단체의 측정 자료도 보조 자료로서 동일한 해석을 하여 비교·검토하도록 기술되어 있다. 그러나 환경영향평가의 대기질 평가분야에 있어서 비용과 편의상의 문제로 인하여 1년간에 걸친 현장관측 기상자료를 실제로 이용하는 경우는 거의 없으며 개발지점에서 가장 근접한 기상관측소의 자료를 현장자료로 이용하고 있다.^{15~17)}

따라서 기상자료는 본 연구지역이 위치한 천안기상관측소의 2004년 하절기 기상자료를 이용하였다. 천안시는 서해안의 해양성 기류의 순전을 차단하여 온난 다습한 기후 특성을 지니고 있다. 연평균 기온은 12.3℃이며, 연평균 강수량은 1,363.30 mm이고 여름철 주풍은 남동풍으로 연평균 풍속이 1.8 m/s로 인접지역인 대전(연평균 기온은 13.2℃, 연평균 강수량은 1,748.90 mm, 풍속이 2.1 m/s)보다 약한 편이다.

이를 바탕으로 풍향, 풍속, 지형을 이용하여 16방위로 바람장미를 Fig. 1에 나타내었고 막대의 중심으로부터 원의 수는 백분율로 발생빈도를 나타내었으며 막대의 종류에 따라 풍속구간을 구분하였다. 그 결과 천안시의 본 과제 연구기간인 하절기 주 풍향은 동풍, 남동풍이고 풍속의 경우 최대 3~4 m/s로 천안의 최대 풍속인 10.3 m/s보다 낮게 나타났다.

2.3. 지형 자료

천안 제 2산업단지는 면적이 823000 m²으로 위도 36.511°, 경도 127.071°에 위치하고 있으며 행정구역으로 차암동과 업성동으로 이루어져 있다. TM 좌표계를 기준으로 보았을 때 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 TMX : 210695, TMY : 372696의 좌표를 가지고 있으며 지형 고도의 높이는 약 40~106 m으로 다양한 분포를 나타냈으며 산업단지의 북동쪽으로 갈수록 고도가 높아지는 것으로 나타났다. 본 연구에 사용된 중심좌표의 고도는 75 m으로 인근 주변의 지형보다 높게 나타났다.

천안 제 2산업단지 주변지역의 지형을 살펴보면, 동쪽이 주거지역과 녹지로 이루어져 있으며, 서쪽은 대규모 사업장이 위치하고 있고, 남쪽은 산업단지 입구로 대로 맞은편에 신시가지와 주거지역 및 천안 제 3산업단지가 형성되는 증이

다. 또한, 북쪽은 산업 단지 내 아파트단지와 천안 제 4산업 단지가 위치하고 있다.

따라서 산업단지를 중심으로 산지 및 타 산업단지, 주거지역으로 인해 인위적으로 둘러싸여 있는 형태를 띠고 있기 때문에 산업단지 내에 대기오염물질 및 악취물질의 농도가 높을 것으로 예상된다.

3. 연구방법

3.1. 조사지점의 선정

본 연구는 온도와 습도가 높은 하절기 특성상 각 물질의 분자운동이 활발해지면서 용해도가 좋은 대기오염물질 및 악취물질의 농도가 높아질 것으로 판단되어 2005년 8월에 측정하였다. 측정지점은 천안 제 2산업단지의 지형적 특성을 고려하여 조사지점을 선정하였으며 Fig. 2에 나타내었다. 따라서 대기오염물질의 측정지점은 신시가지가 맞은편에 형성되고 있는 남쪽의 산업단지 입구와 주거지역과 타 산업단지가 위치한 북쪽의 경계지점 두 곳을 선정하였으며, 악취물질의 시료채취지점은 부지경계선을 바탕으로 각 방위마다 한 지점씩 4지점을 선정하였다.

이는 대기오염공정시험법에 의거하여 주위 건물 등이 밀집되었을 경우 건물 밖으로부터 최소 1.5 m 이상 떨어진 곳을 선택하였고 시료채취 높이는 1.5~2.0 m 범위에서 부근의 평균오염도를 나타낼 수 있는 장소로 하였다.⁵⁾ 측정지점 중 O-2지점은 지형이 낮은 곳에 2~3개 사업장이 위치하고 있었기 때문에 부지경계지점이 명확하지 않아 그 중간 지점인 고도가 높은 지역의 경계를 측정지점으로 선정하였다.

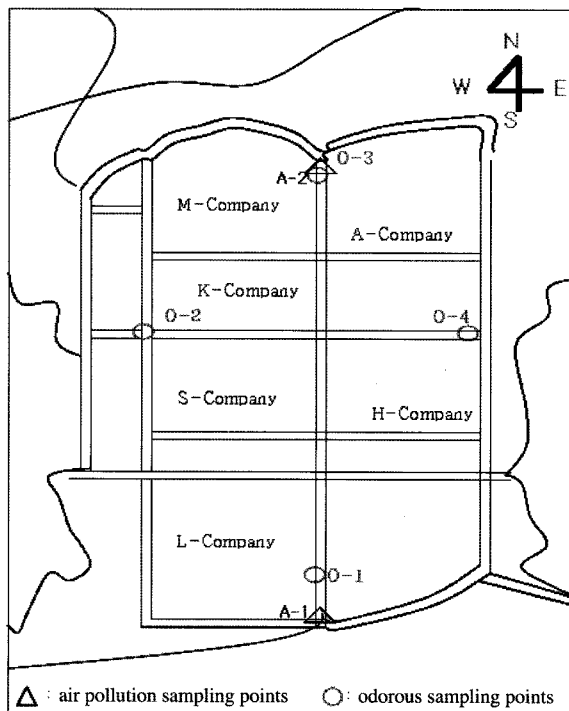


Fig. 2. Selection of sampling points.

Table 1. Summary of instrumental of methods for air pollution analysis

Compound	Chemical formula	Methodology
Carbon monoxide	CO	Non-dispersive infrared method
Nitrogen dioxide	NO ₂	Chemiluminescent method
Sulfurous acid	SO ₂	Pulse U. V. fluorescence
Particle meter	PM ₁₀	β-Ray Absorption method

Table 2. Summary of instrumental condition and of methods for odorous compounds analysis

Compound	Contents	Methodology	Instrumental and analytical condition
Odorous compounds		Air dilution	Olfactometry, Tedlar bag
Ammonia	Ammonia	Absorptiometric analysis	UV-vis, Shimadzu1201, Liquid absorbtion
Sulfur Compound	Hydrogen Sulfide Methyl mercaptan Methyl sulfide Methyl disulfide	GC/FPD	GC-17A, Shimadzu : Tedlar bag
Aldehyde	Acetaldehyde Propion aldehyde N-Butylaldehyde N-Valeraldehyde Iso-Valeraldehyde	HPLC/UV	HPLC, Younglin : 2,4-DNPH cartridge
Amine	Trimethylamine	GC/FID GC/NPD	GC-17A, Shimadzu : Sulfate deposition filter
Hydro Carbon	Styrene	GC/MSD	HP-6890, HP-5973N : Canister

3.2. 시료 채취 및 측정방법

대기오염물질은 천안 제 2산업단지에서 배출되는 CO, NO₂, SO₂, PM₁₀을 대기오염 이동자동측정차량을 통해 1일을 기준으로 24시간을 측정하였다. 또한, 악취물질은 2005년 2월부터 시행되어진 복합악취와 지정악취물질인 암모니아류, 황화합물류, 알데히드류, 탄화수소류 등의 12가지 물질에 대해 국립환경연구원에서 제시한 악취공정시험법에 의거하여 시료채취 및 측정을 하고 국가 지정 악취물질 분석기관에 의뢰하였다.

4. 결과

4.1. 대기오염물질 측정결과

대기오염물질은 1일 기준으로 1시간에 1번씩 측정하여 매 시간에 따른 농도 그래프로 나타내었으며 환경배출기준 중에서 농도가 높은 기준에 비교하였다. 따라서 CO, NO₂, SO₂는 1시간 평균 기준치에 비교하였으며, PM₁₀은 24시간 평균 배출기준에 비교하였다.

그 결과 A-1지점에서는 CO, NO₂, SO₂가 각각 523.78 ppb, 0.016 ppb, 0.004 ppb로 나타났으며, A-2지점에서는 CO, NO₂, SO₂가 536.77 ppb, 0.014 ppb, 0.004 ppb로 1시간 평균기

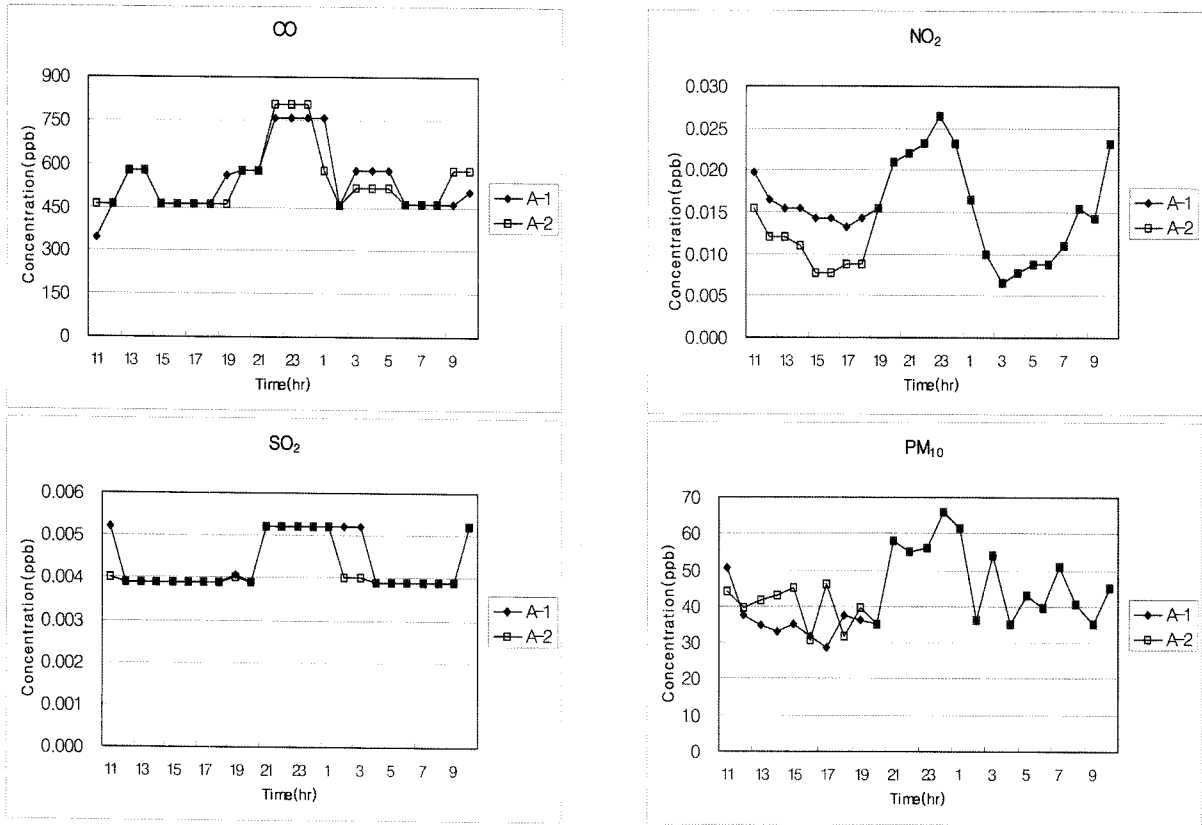


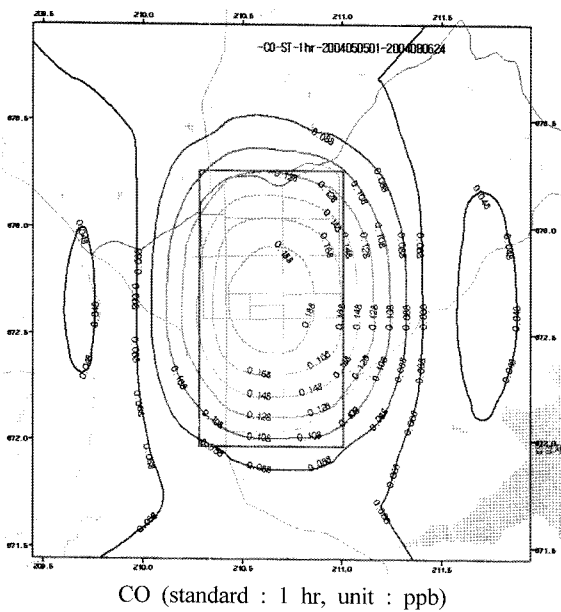
Fig. 3. Measurement results of air pollutants at cheon-an second industrial complex in summer.

준치에 만족하는 결과를 보였다. PM10은 A-1지점, A-2지점이 각각 $43 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 24시간 평균 배출기준치($150 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에 비해 적게 나온 것으로 보아 CO, NO₂, SO₂, PM₁₀은 산업단지의 대기질 전반에 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 판단된다. Fig. 3의 그래프를 보면 CO, NO₂, SO₂, PM₁₀이 동일한 시간대에(23시~3시) 측정치가 높아지는 것을 볼 수 있는데 이는 밤~새벽에 하층의 기온이 낮아짐에 따라 상층부

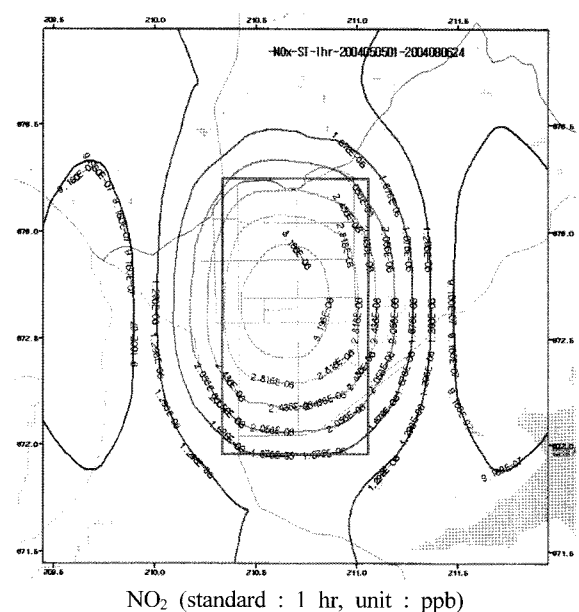
에 역전현상이 일어나 하층에 대기 불안정상태에서 지표농도가 올라가면서 연원에 의한 오염도 농도가 높아지는 것으로 사료된다.

4.2. 대기 확산 모델링 결과

산업단지 내 대기질에 대한 대기오염물질 측정치는 환경 배출기준치를 만족하였지만, 단기간 내 특정지점에 대한 대



CO (standard : 1 hr, unit : ppb)



NO₂ (standard : 1 hr, unit : ppb)

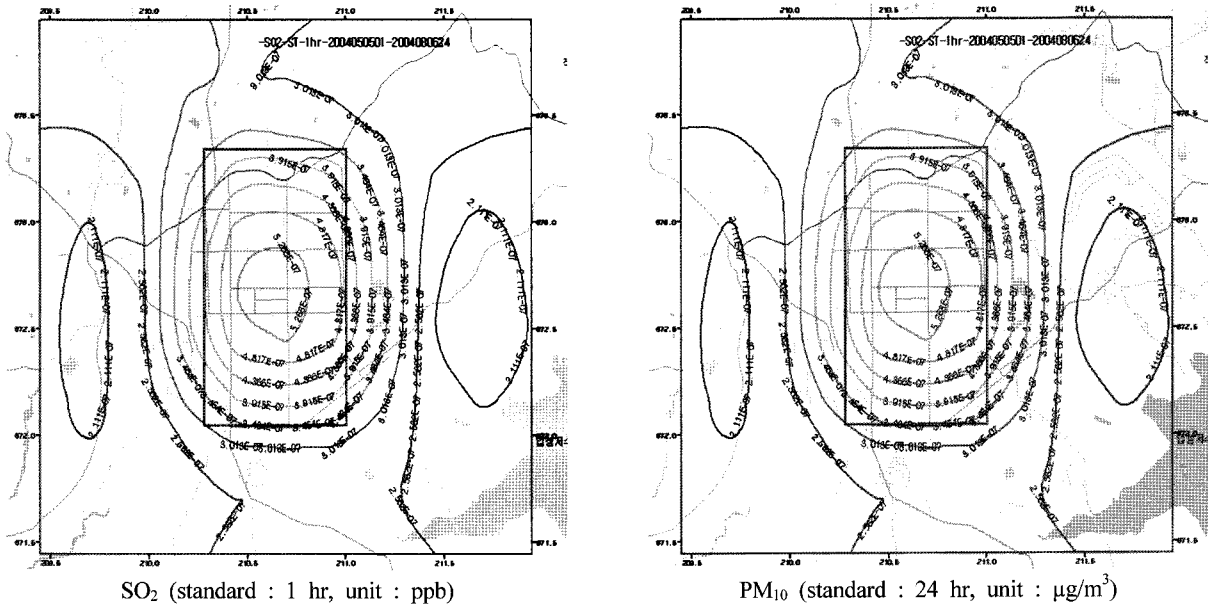


Fig. 4. Modeling result of cheon-an second industrial complex in summer.

기환경기준치의 초과 유무를 알아보기 위해 위의 자료를 토대로 CO, NO₂, SO₂, PM₁₀을 1시간 최대 농도를 기준으로 대기확산모델링을 실행하였다.

모델링 결과 4개의 대기오염물질 모두 기준치 이하로 환경배출 기준에 만족하는 결과를 나타냈다. Fig. 4를 보면 주변 지역으로 갈수록 대기오염농도가 낮아지는데 이는 북쪽과 서쪽, 동쪽이 산지와 타 산업단지, 주거지역 등으로 둘러싸여 산업단지가 인위적인 지형을 형성하기 때문에 대기 중에 배출되는 대기오염물질이 산업단지 외로 배출되지 못하고 정체하게 되면서 천안 제 2산업단지 내에서도 고도가 낮은 지역 주위의 농도가 높게 나타나는 것으로 판단된다.

또한, 모델링 후 Table 3에 최대농도별 순위를 나타내었는데 최고농도는 고도가 55 m이고 TM좌표(210320, 372071) 지점인 곳으로 1시간 최고 상위농도는 CO, NO₂, SO₂가 각각 0.4489 ppb, 7.713E-06 ppb, 1.467E-06 ppb이고 PM₁₀의 24시간 평균농도 중 최고농도는 0.5023 µg/m³로 대기환경배출 기준치를 초과하지 않는 것으로 나타났다. 따라서 천안 제 2산업단지 내 주거지역과 주변지역의 대기질에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

Table 3. Precedence of maximum concentration

Precedence of maximum concentration	CO	NO ₂	SO ₂	PM ₁₀	Altitude
Unit	ppb	ppb	ppb	µg/m ³	m
Standard of time	1 hr	1 hr	1 hr	24 hr	40~106
1	0.4489	7.713E-06	1.467E-06	0.5023	55
2	0.4468	7.676E-06	1.460E-06	0.5011	61
3	0.4464	7.669E-06	1.459E-06	0.4999	60
4	0.4453	7.657E-06	1.458E-06	0.4988	80
5	0.4452	7.652E-06	1.456E-06	0.4986	80

4.3. 악취물질 측정결과

악취물질은 순간적으로 발생하는 감각공해이므로 현장 측정값에 대해서만 악취공정시험법에 의거하여 분석하였다.⁵⁾

복합악취의 경우 부지 경계선에서 측정하는 방법을 사용하여 회석배수로 나타낸 결과 측정값 모두 10 이하로 공업지역 배출허용기준인 20 이하를 만족하는 것으로 나타났다.

지정악취물질 중 암모니아는 O-1~O-4지점 모두 기준치(2,000 ppb) 이하의 값(45.0 ppb, 46.0 ppb, 73.0 ppb, 115 ppb)이 검출되었다. 황화합물의 경우 황화수소는 2.9~3.9 ppb로 미량이 검출되었고 메틸메르캅탄은 O-2지점에서 6.3 ppb로 배출허용기준보다 약 1.5배 초과하였다. 알데히드류의 경우 아세트알데히드는 O-2지점에서 144 ppb로 기준치보다 약 1.4배 높게 측정되었으며, 프로피온알데히드는 O-2, O-3, O-4지점에서 각각 158.1 ppb, 293.6 ppb, 350.5 ppb로 기준치보다 2~3배 높게 검출되었다. 아민류는 검출되지 않았으며 탄화수소류는 극미량 검출된 것으로 보아 황화합물이나 알데히드에 비해 천안 제 2산업단지의 악취발생에 적은 영향을 미치는 것으로 판단된다.

연구기간인 하절기동안 주풍향이 동풍, 남동풍이었기 때문에 서쪽, 북쪽 지역인 O-2지점과 O-3지점 중 고도가 낮은 지형에 악취물질이 정체하게 되면서 하절기 기온에 의해 용해도가 좋은 메틸메르캅탄과 알데히드류의 농도가 높아진 것으로 판단된다. 또한, 산업단지 경계 부근이 지형적 특성상 오염물질 순환하지 못하고 한곳에 정체하게 되면서 농도가 높아진 것으로 사료된다.

5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 복합지형의 특성을 보이는 천안 제 2산업단지를 대상으로 하절기 대기오염물질을 측정하여 모델링 하

Table 4. Analysed results of odorous materials

Compounds		Positions(ppb)				Standard (industrial complex)
		O-1	O-2	O-3	O-4	
Odorous compounds(Dilution)		under 10	under 10	under 10	under 10	under 20
Ammonia		45.0	46.0	73.0	115.0	under 2,000
Sulfur compounds	Hydrogen Sulfide	3.9	2.9	2.9	3.6	under 60
	Methyl mercaptan	2.2	6.3	ND	ND	under 4
	Dimethyl sulfide	ND	ND	ND	ND	under 50
	Dimethyl disulfide	ND	ND	ND	ND	under 30
Aldehyde	Acetaldehyde	80.6	144.0	24.1	32.5	under 100
	Propion aldehyde	67.2	158.1	293.6	350.5	under 100
	N-Butylaldehyde	69.2	53.2	53.2	61.4	under 100
	N-Valeraldehyde	ND	ND	ND	ND	under 20
	Iso-Valeraldehyde	6.0	ND	ND	69.9	under 6
Amine	Trimethylamine	ND	ND	ND	ND	under 20
Hydro carbon	Styrene	1.7	0.9	1.1	0.6	under 800

고 악취물질은 시료채취 후 분석을 실시하여 주변지역에 영향을 끼치는 대기오염물질과 악취발생물질의 종류와 발생 원인을 규명하였다.

먼저 대기오염물질 측정결과 A-1지점에서는 CO, NO₂, SO₂가 각각 523.78 ppb, 0.016 ppb, 0.004 ppb로, A-2지점에서는 CO, NO₂, SO₂가 536.77 ppb, 0.014 ppb, 0.004 ppb로 나타났으며 1시간 평균기준치에 만족하는 결과를 보였다. PM₁₀은 A-1지점, A-2지점이 각각 43 µg/m³, 45 µg/m³로 24시간 평균 배출기준치(150 µg/m³)에 비해 적게 측정되었다. 따라서 대기오염물질은 산업단지 전반에 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 판단된다.

또한, 대기오염 확산 모델링은 ISCST3모델을 사용하여 TM(210695, 372696)좌표로 2.5 km × 2.5 km지역을 21 × 21로 격자 분할하여 국토지리정보원에서 제공하는 1 : 25000 지형도와 2004년 천안기상관측소의 하절기 기상 평균 시간자료를 가지고 모델링 한 결과 4가지 물질 모두 대기환경기준을 만족하는 결과를 보였다. 모델링 후 최대농도별 순위를 보면 최고농도는 고도가 55 m이고 TM좌표(210320, 372071)지점인 곳으로 1시간 최고 상위농도는 CO, NO₂, SO₂가 각각 0.4489 ppb, 7.713E-06 ppb, 1.467E-06 ppb이고 PM₁₀의 24시간 평균농도 중 최고농도는 0.5023 µg/m³로 대기환경 기준치를 초과하지 않는 것으로 나타났다.

악취물질의 분석결과 복합악취의 경우 배출허용기준을 만족하였으며, 지정악취물질 중 암모니아는 O-1~O-4지점 모두 배출허용기준치(2,000 ppb) 이하의 값(45.0 ppb, 46.0 ppb, 73.0 ppb, 115 ppb)이 검출되었으며 아민류는 검출되지 않았고 탄화수소류는 O-1~O-4지이 각각 0.6 ppb, 0.9 ppb, 1.1 ppb, 1.7 ppb로 극미량 검출되었다. 황화합물 중 메틸메르캅탄은 O-2지점에서 6.3 ppb로 알데히드류 중 아세트알데히드는 O-2지점에서 144 ppb로 프로피온알데히드는 O-2, O-3, O-4지점에서 각각 158.1 ppb, 293.6 ppb, 350.5 ppb로 기준치보다 높게 검출되었다. 이는 연구기간인 하절기의 주풍향

이 동풍, 남동풍이었기 때문에 서쪽, 북쪽 지역인 O-2지점과 O-3지점 중 고도가 낮은 지형에 악취물질이 정체하면서 농도가 높아진 것으로 판단된다.

이와 같이 대기오염물질과 악취물질은 기상과 지형에 영향을 많이 받기 때문에 천안 제 2산업단지처럼 둘러싸인 구릉 지형대로 되어 있는 곳은 오염물질이 순환하지 못하고 한곳에 정체하게 되면서 농도가 높아지는 경우가 있으므로 인근에 대기 및 악취에 대한 대기환경통합관리 시스템을 정비하여 산업단지 내 대기환경에 대한 체계적인 관리를 하여야 한다.

사 사

이 논문은 2005년 충남환경기술개발센터에서 지원한 연구비로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 안상영, 최성우, 산업단지에서 배출되는 악취원인물질의 규명, 한국환경과학회지, **14**(11), 81~89(2005).
2. 박찬진, 인천의 지역별 악취발생과 저감방안에 관한 연구, 환경관리학회지, **11**(1), 37~47(2005).
3. 송동웅, 송창근, 미세격자대기확산모델링을 통한 안산지역 PM₁₀ 고농도 사례분석, 한국환경과학회지, **12**(9), 977~986(2003).
4. 서경석, 김은한, 황원태, 정효준, 한문희, 이창우, 복잡한 지형상에서 대기확산 수치 모델링, 대한환경공학회, 추계 학술대회논문집, **6**(2), 568~572(2004).
5. 국립환경연구원, 악취공정시험방법(2005).
6. Fisher, P. W. and Foster, J. A., Comparison of the ISCST model with two alternative U.S. EPA models in complex terrain in Hamilton Country, Ohio, *J. Air & Manage. Assoc.*, **44**, 418~427(1994).

7. U.S. Environmental Protection Agency, User's Guide for the Industrial Source Complex(ISC3) dispersion models volume I(1995).
8. USEPA, User's guide for the Industrial Source Complex (ISC3) dispersion models, volume II - Description of model algorithm, EPA-454/B-95-003b, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC27711 (1995).
9. 이화운, 원경미, 배성정, 점오염원의 대기확산에 관한 민감도 분석과 모델링, 한국환경과학회지, 9(1), 57~64(2000).
10. 구윤서, 박성순, 윤희영, 김성태, 전경석, 김주현, 김종화, 대기확산모델링용 기상처리 software, 대한환경공학회, 춘계학술연구발표회논문집(II)(2000).
11. 정진도, 천안 제 2산업단지에서 발생하는 대기오염 및 악취물질에 관한 연구, 충남환경기술개발센터 최종보고서, 40~44(2005).
12. 이화운, 원경미, 배성정, 대기확산모델을 사용한 공단주변지역의 대기오염물질농도 예측 및 평가, 한국환경과학회지, 8(4), 485~490(1999).
13. 장영기, 송동용, 국내 대기질 모델링의 현황과 발전방향, 한국대기보전학회지, 11(1), 1~14(1995).
14. 정진도, 김장우, 김정태, 입력변수 조건에 따른 대기확산모델의 민감도 분석, 한국환경과학회지, 14(9), 851~860(2005).
15. 주수영, 신보균, 환경영향평가실무, 동화기술, pp. 423(1998).
16. 김유근, 이화운, 대기오염개론, 시그마프레스, pp. 280(1999).
17. 박명희, 김해동, 박미영, 기상자료에 따른 대기오염확산 민감도 평가, 한국환경과학회지, 14(2), 141~156(2005).