

AERMOD 모델을 이용한 산단 지역 악취 배출량 및 주거지역 영향 범위 평가

Estimation of Odor Emissions from Industrial Sources and Their Impact on Residential Areas using the AERMOD Dispersion Model

정 상 진*

경기대학교 환경에너지시스템공학과

(2010년 10월 25일 접수, 2010년 12월 16일 수정, 2010년 12월 30일 채택)

Sang Jin Jeong*

Department of Environmental and Energy Systems Engineering, Kyonggi University

(Received 25 October 2010, revised 16 December 2010, accepted 30 December 2010)

Abstract

In this study, the AERMOD dispersion model was used for predicting odor concentrations and back-calculating industrial area source odor emission rate. The studied area was Sihwa industrial complex in Korea. Odor samples were collected during two days over a year period in 2009. The comparison between the predicted and observed concentrations indicates that the AERMOD model could fairly well predict average downwind odor concentrations. The results show odor emission rates of Sihwa industrial complex area source were ranged from 0.204 to 2.320 OUMs⁻¹ (average 0.476 OUMs⁻¹). The results also show wind speed and direction are important parameters to the odor dispersion.

Key words : Industrial complex, Odor, AERMOD model, Area source, Emission rate, Residential area effect

1. 서 론

인구 증가에 따른 주거단지의 확장으로 많은 주거 단지가 악취 오염원 부근에 위치하고 있는 실정이다. 이에 따라 매립지와 산업단지에서 발생하는 악취제어는 악취 민원을 관리하는 행정당국에서 지속적으로 관리하여야 하는 문제이다(Drew *et al.*, 2007).

한국에서는 산단 지역에서 배출되는 악취 관련 문제를 효율적으로 관리하기 위하여 2005년 대기환경보전법과 분리하여 악취방지법을 제정하였다. 또한 엄격한 악취배출기준을 적용하는 악취관리지역을 지정하여 지속적으로 관리하고 있다. 이에 따라 2007년 까지 전국에 16개의 악취관리지역이 지정되어 있으며 이들 중 대부분이 공단 또는 산단 지역(15개소)이고 1개소는 폐수처리장이다(경기도보건환경연구원, 2008). 따라서 산단 지역에서 악취 관리를 위하여 악취에 대한 연구는 지속적으로 수행되어야 할 과제

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)31-249-9734, E-mail : sjjung@kyonggi.ac.kr

이다.

체감악취가 인체에 미치는 영향은 심각할 정도는 아니다(Rosenkranz and Cunningham, 2003). 그러나 악취는 불쾌감을 유발하므로 대기 오염물질로 분류되어 관리되고 있다(Nicell, 2009). 폐수처리장, 매립지 그리고 동물 사육장 등 먼 오염원에서 배출되는 악취는 발생, 수송, 확산, 그리고 수용체(receptor)에서 인지되는 복잡한 과정을 거치게 된다(Smith, 1995).

외국에서는 기지의 오염원에서 배출되는 악취 오염물질의 수용체에서 농도를 예측하기 위하여 수 많은 확산 모델이 사용되어 왔다. Smith(1995)는 먼 오염원에서 배출된 악취 물질의 하류에서 농도 평가를 위하여 Gaussian 모델을 사용하였다. 그 결과 오염원 크기, 지표면의 조도 그리고 대기안정도가 평균 농도 배출량 산정에 중요한 인자라고 하였다. Mussio *et al.* (2001)은 연속 점 오염원에서 배출되는 악취 물질에 의한 악취영향 빈도를 계산하기 위하여 fluctuation plume dispersion model을 개발하여 자동차 도장 공장 주변의 악취 발생 빈도를 평가한 결과 악취 발생 빈도를 잘 모사할 수 있었다. Saker *et al.* (2003)은 London 북쪽에 있는 매립지에서 배출되는 악취 이격 거리를 평가하기 위하여 미국 EPA에서 제공하는 COMPLEX-1 모델을 사용하였다. 그들은 악취 이격 거리를 정확히 평가하기 위한 인자로 풍향, 풍향빈도, 대기안정도, 악취 감지한계, 평균 시간 등을 제안하였다. Sheridan *et al.* (2004)은 아일랜드에 있는 축사에서 배출되는 악취로 인한 기준 농도에 대한 이격 거리를 평가하기 위하여 ISCST3 모델을 사용하였다. 그들이 제시한 악취 기준을 사용하는 경우 이격거리가 1,000m로 미국 EPA에서 제공하는 기준으로 평가한 780m보다 먼 것으로 나타났다. Wang *et al.* (2006)은 CALPUFF와 ISCST3 모델을 사용하여 축사에서 배출되는 악취의 확산을 평가하였다. 현장 관측치와 비교에서 두 모델 모두 악취 배출량을 과대평가한다고 하였다. Drew *et al.* (2007)은 ADMS 3.1 모델을 사용하여 각기 다른 평균 시간 농도를 사용하는 경우 매립지 주변의 체감 악취 평가를 하였다. 그들은 피크 농도를 사용하는 경우 체감 악취를 더 잘 평가할 수 있다고 하였다.

산단 지역에서 악취 배출량 산정 및 영향 평가에 대한 국내 연구로는 Jeong(2002), Choi *et al.* (2005), Jeon *et al.* (2006), Kim *et al.* (2007) 그리고 Jeong

(2011)의 연구가 있다. Jeong(2002)은 AUSPLUME 모델을 이용하여 악취의 영향을 피하기 위한 산단 지역과 주거 단지 사이 이격거리에 대한 연구를 한 결과 산단 지역 이격거리는 유럽에서 축산농가에 적용되는 이격거리와 유사하다고 하였다. Choi *et al.* (2005)은 산단 지역 대기배출시설의 악취성 화합물의 측정 및 배출 특성을 분석하였다. 그들은 산단 지역 배출원에서 황화수소의 배출량이 가장 많은 것을 확인하였다. Jeon *et al.* (2006)은 폐수처리장의 악취 배출 특성을 연구한 결과 침전조에서 황화수소와 암모니아가 가장 많이 배출됨을 확인하였다. Kim *et al.* (2007)은 공단 주변 주거지역에서 악취 배출 현황을 측정하고 악취 체감도를 검토한 결과 계절별로 가을철에 거의 모든 대상지역에서 악취가 감지될 것으로 판정하였다. Jeong(2011)은 CALPUFF와 AERMOD 모델을 이용하여 산단 지역에서 악취 배출율을 평가한 결과 AERMOD 모델의 예측치가 CALPUFF 모델의 그것보다 약간 높게 나타난다고 하였으나 그 차이는 그리 크지 않았다고 하였다.

이상의 국·내외 연구에서 알 수 있는 바와 같이 국외에서는 확산 모델을 이용한 악취 배출원의 배출량 평가는 활발히 이루어지고 있지만 국내에서는 Jeong(2002)과 Jeong(2011)의 연구를 제외하고는 현장 관측을 통한 악취 배출량과 체감도를 평가한 연구가 대부분이다. 따라서 본 연구에서는 대상영역이 50km 이하(미국 EPA에 따르면 대상 영역이 50km 이하인 경우 AERMOD 모델을 추천하고 있음)이므로 AERMOD 모델을 사용하여 산단 지역에서 악취 배출량을 산정하고 인접 주거단지에 미치는 영향을 평가하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 확산 모델

AERMOD 모델은 실외 대기오염물의 농도를 예측하는 최근 모델로 미국 EPA에서 지칭하는 공식모델이다. 미국 EPA에서는 대상영역이 단거리(50km 이하)인 경우 AERMOD 모델 사용을 추천하고 있다(Zou *et al.*, 2009). 본 연구는 대상영역이 7km×8km이므로 AERMOD 모델을 사용한다.

AERMOD 모델은 정상상태 플룸 모델(plume

model)이다. 모델 시스템은 주 프로그램 (AERMOD) 과 두 가지 전처리 프로세스로 AERMET과 AERMAP 를 가지고 있다. AERMET는 기상 전처리 시스템으로 AERMOD의 기상 입력자료를 생성하는 프로그램이다. AERMAP는 지형에 대한 전처리 프로그램이다. 일반적으로 AERMOD 모델은 플룸을 수평방향 플룸 (지형에 충돌하는 플룸)과 지형을 따라가는 플룸의 두 가지 조합으로 모델화 했다. 그러므로 모든 상황에서 수용체에서 총 농도는 이들 상태에 따라 예측된다. 평지에서는 두 상태가 동일하지만 높은 지형이 있는 경우 AERMOD에서는 유선 분리고도(dividing streamline height) 개념을 도입하여 총 농도는 이들 두 가지의 한계 경우 또는 플룸의 상태를 고려하여 계산한다(U.S. EPA, 2004). AERMOD 모델에서 안정 또는 대류상태(convective condition) 대기에서 농도를 구하는 식은 다음과 같다.

$$C_T\{x_r, y_r, z_r\} = f \cdot C_{c,s}\{x_r, y_r, z_r\} + (1-f)C_{c,s}\{x_r, y_r, z_p\} \quad (1)$$

여기서 $C_T\{x_r, y_r, z_r\}$ 는 총 농도이고, $C_{c,s}\{x_r, y_r, z_r\}$ 는 수평 플룸 상태의 기여 분(첨자 c와 s는 각각 대류 상태와 안정 대기)을 나타낸다. $C_{c,s}\{x_r, y_r, z_p\}$ 는 지형을 따라가는 상태의 기여 분을 나타내고, f는 플룸 상태에 따른 무게함수(weighting function), $\{x_r, y_r, z_r\}$ 는 수용체 좌표이고 z_r 은 굴뚝 바닥으로부터 참조 지점까지 높이이다. $z_p = z_r - z_t$ 은 국소 지표 높이에서 수용체까지 높이이고 z_t 는 수용체의 지표면 고도이다.

2.2 역 추정 악취 배출량 (Back-calculating Odor Emission Rates)

산단 지역 먼 오염원에 대한 배출량은 오염원 부근과 오염원 하류에서 관측된 농도를 이용하여 확산 모델에서 계산할 수 있다. Smith (1993)는 현장 관측 악취 농도(OU: Odor Unit)와 확산 모델을 사용하여 구한 악취 농도(OU)를 동일 단위로 하기 위하여 악취 배출량을 점 오염원은 OUm^3s^{-1} , 선 오염원은 OUm^2s^{-1} , 면 오염원은 $OUms^{-1}$ 으로 정의해야 한다고 하였다. Wang *et al.* (2006)에 따르면 하류에서 농도 C_2 (OU)가 주어지면 이에 상응하는 배출량 Q_2 ($OUms^{-1}$, 면 오염원으로)는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$Q_2 = Q_1 \times C_2 / C_1 \quad (2)$$

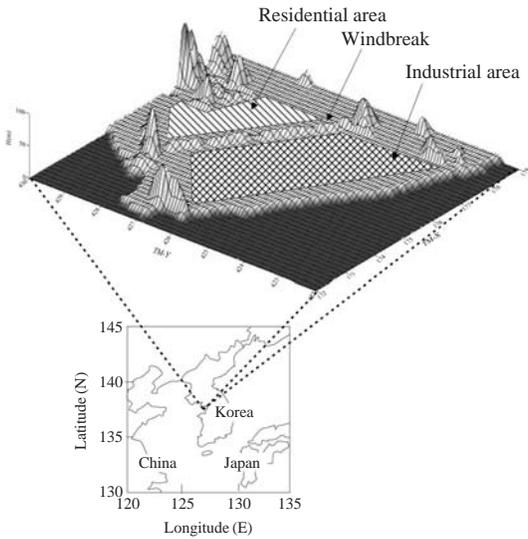


Fig. 1. Computational domain of Sihwa industrial complex.

여기서 Q_1 ($OUms^{-1}$)은 초기 모델 농도 C_1 (면 오염원에서 OU)에 상응하는 배출량이다.

2.3 계산 영역과 악취 현장 관측

시화 산단은 한국 서해안에 위치하며 북동쪽에 인접하는 주거단지와의 약 175 m 떨어져 있으며 전체 면적이 약 $11.7 km^2$ (약 $2.6 km \times 4.5 km$)이다. 그림 1에서는 연구 대상영역을 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 시화 산단은 서쪽과 남쪽은 서해에 접해 있고 산단과 주거지역 사이에는 높이 약 20 m의 방풍림이 조성되어 있다. 시화 산단은 수도권 정비를 위하여 비도시형인 공해유발업체를 이주시킬 목적으로 조성된 대규모 산업단지로서 약 580개의 업체가 입주해 있으며 화학, 피혁, 염색, 폐기물처리, 금속산업 등이 혼재되어 있다(시흥환경기술개발센터, 2008).

그림 2에는 산단 지역과 주거지역이 포함되는 계산영역을 나타내었다. 계산영역은 $7 km \times 8 km$ 를 선택하였으며 격자간격은 100 m로 하였다. 배출량 산정과 확산 해석을 위하여 도로를 경계로 오염원을 23 개 블록으로 나누어 블록 내부에서 악취 농도를 측정하였다. 악취 측정은 경기도 보건환경연구원서 2009년 3월 25일과 26일 사이 주야 1회씩 총 4회 (샘플 수 92개) 실시하였다. 샘플은 악취 공정시험법

(국립환경연구원, 2005)에 따라 분석되었고 본 연구에서는 측정된 자료 중 복합 취기강도를 사용하였다. 각 샘플 당 시료채취 시간은 3분이었다. 악취 시료는 10-L 테트라 백을 사용하여 지상 1 m 높이에서 포집

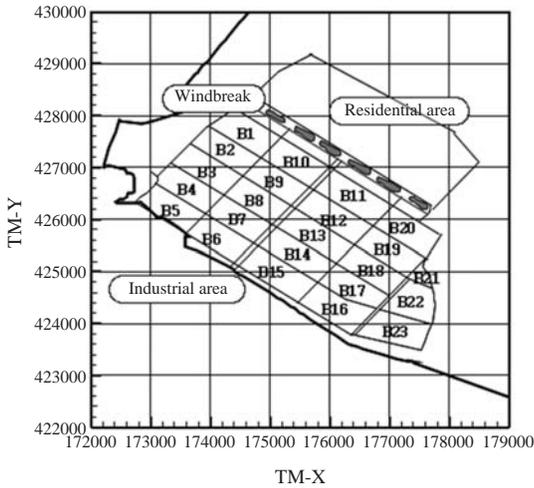


Fig. 2. Computational region and distribution of odor source block.

하였다.

Faulkner *et al.* (2007)에 따르면 확산 모델로 특정 오염원의 배출량을 산정하는 경우 주변에 다른 오염원이 있는 경우 계산 배출량은 다른 오염원의 영향을 받는다고 하였다. 그러나 샘플링 위치가 오염원에 근접하면 할수록 다른 오염원의 영향이 줄어든다고 하였다. 그리고 샘플링 위치가 LMC (Line of maximum concentration) 또는 오염원 내부에 있으면 플룸의 가장자리 부근에서 발생하는 모델링의 불확실성을 피할 수 있다고 하였다. 본 연구에서는 각 블록 별 오염원은 인접하고 있으므로 악취 배출량 산정을 위한 현장 측정 위치를 인접 오염원의 영향을 최소화하기 위하여 그림 2에 나타난 바와 같이 각 오염원 블록 내에서 측정하였다.

AERMET을 수행하기 위한 지표부근 기상자료는 인천기상자료를 사용하였으며 고공기상자료는 오산기상관측자료를 사용하였다. 악취 오염물의 이동은 풍향과 풍속에 민감하므로 풍향 풍속 자료는 현장에서 관측된 기상자료를 사용하였다. 현장 기상자료는 대상영역 내부에 있는 시흥기술개발센터에서 측정된 풍향 풍속자료를 사용하였다.

Table 1. Predicted emission rates (OUms⁻¹) of various source blocks.

Block No.	Sampling site	2009.03.25		2009.03.26		Average
		Day	Night	Day	Night	
1	Chemical, Food	0.414	0.155	0.519	0.221	0.327
2	Chemical, Plastic	0.386	0.146	0.961	0.225	0.430
3	Chemical, Gas	1.305	0.195	0.979	0.609	0.772
4	Chemical, Paper, Food	1.918	0.308	0.555	0.355	0.784
5	Waste, Sewage, Textile	3.107	1.533	2.884	1.758	2.320
6	Power plant, Steel	0.442	0.207	0.412	0.257	0.330
7	Machine, Paper	0.387	0.162	0.361	0.201	0.278
8	Automobile, Plating	0.446	0.149	0.337	0.183	0.279
9	Machine, Copper	1.176	0.216	0.328	0.178	0.474
10	Machine, Steel	0.342	0.213	0.318	0.264	0.284
11	Machine, Metal	0.342	0.125	0.303	0.154	0.231
12	Machine, Electronic	0.340	0.072	0.842	0.161	0.354
13	Machine, Electronic	0.354	0.080	0.319	0.174	0.232
14	Electronic, Metal	0.377	0.094	0.341	0.201	0.253
15	Machine, Metal	0.458	0.131	0.409	0.269	0.317
16	Steel, Chemical	0.468	0.141	0.418	0.197	0.306
17	Steel, Machine	0.380	0.096	0.344	0.131	0.238
18	Steel, Formula feed	0.531	0.121	0.322	0.110	0.271
19	Steel, Pulp	0.341	0.071	0.308	0.097	0.204
20	Pulp, Paper	1.903	0.435	2.473	0.432	1.311
21	Furniture, Steel	0.283	0.472	0.369	0.098	0.305
22	Pulp, Paper	0.305	0.115	0.396	0.319	0.284
23	Paint, Glass	0.380	0.155	0.727	0.161	0.356

3. 결과 및 고찰

3.1 블록 별 배출율

표 1에서는 AERMOD 모델을 사용하여 산정한 각 블록 별 추정 배출율을 나타내었다. 배출율 추정에 사용된 풍속은 대상기간(2009년 3월 25~26일) 동안 주간(15:00~18:00)에는 1.2~1.6 ms⁻¹, 야간(19:00~22:00)에는 1.2~2.8 ms⁻¹였다. 풍향은 주간에는 서남서풍이 주로 불었으며 야간에는 서풍이 불었다.

추정된 배출율은 5번 블록(하수종말처리장 부근)과 20번 블록(제지단지)에서 높게 나타난 것을 제외하면 다른 블록의 배출율은 비슷한 값을 나타내었다. 계산된 배출율의 범위는 0.204에서 2.32 OUms⁻¹(평균배출율 0.476 OUms⁻¹)으로 Wang *et al.* (2006)이 측사에서 구한 배출율의 범위 0.38에서 2.27 OUms⁻¹(평균배출율 1.19OUms⁻¹)과 유사한 값으로 나타났다.

그림 3에서는 추정 배출율 자료의 관측 농도 재현성을 검토하기 위하여 추정 배출율을 입력자료로 사용하여 구한 계산농도와 동일시간에 현장에서 관측된 농도를 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 추정 배출율로 구한 농도는 관측농도와 선형상관이 큰(R=0.891)것으로 나타났다.

3.2 악취의 영향범위

악취의 피해를 관리하기 위하여 일반적으로 악취 환경기준을 나타내는 지표로 대부분의 나라에서 OU

를 사용하고 있다. 본 연구에서는 악취의 영향범위를 정하기 위하여 표 2에서 악취 농도에 대한 선택된 나라들의 기준 농도를 나타내었다. 악취 기준 농도는 각국에서 다양한 방법으로 환경기준과 배출기준을 혼재하여 지정하고 있다. 표에서 알 수 있는 바와 같이 한국의 경우 부지경계에서 배출기준만 있다. 따라서 본 연구에서는 악취 환경기준으로 EU에서 채용한 1OU를 최저인식 농도로 하여 영향범위 계산 결과를

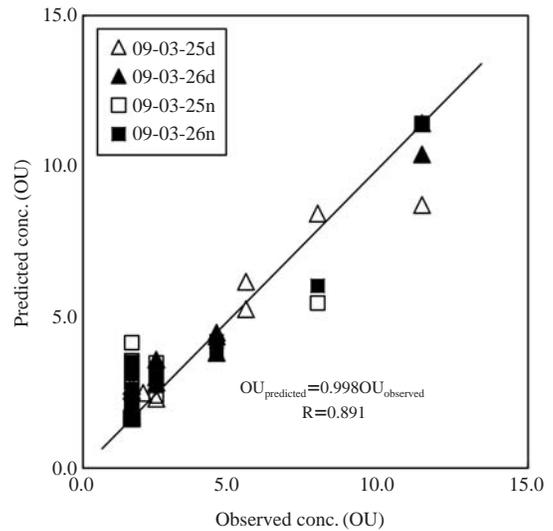


Fig. 3. Comparison between predicted and observed concentrations. “d” and “n” denote day and night, respectively.

Table 2. Odor Standards and regulation for selected countries (Drew *et al.*, 2007).

Country	Odor standards
Australia	Odor assessed at receptor (except in Victoria where assessment is at the property boundary). Odor concentrations and percentiles vary for each state
Denmark	Should not exceed 5~10 OUm ⁻³
European Union (draft for sewage treatment works)	Zero odor at site boundary or residential area; or less than 1 OUm ⁻³ for more than 98% of the time
Germany	Residential and mixed areas; 0.1 odor hours Industrial and commercial areas 0.15 odor hours
Japan	Uses 0~5 odor-intensity scale, with 0 being no odor and 5 being repulsive. Odor is acceptable at 2.5~3.5 on this scale
UK	5 OUm ⁻³ for 98% of the year (de facto level) 5 OUm ⁻³ as a 98th percentile for new-build waste treatment plants 10 OUm ⁻³ as a 98th percentile for existing waste treatment plants
USA	No odor should be detected at site boundary.
Korea*	Odor assessed at boundary. 15~20 OU at site boundary

*National Institute of Environment Research in Korea (2005)

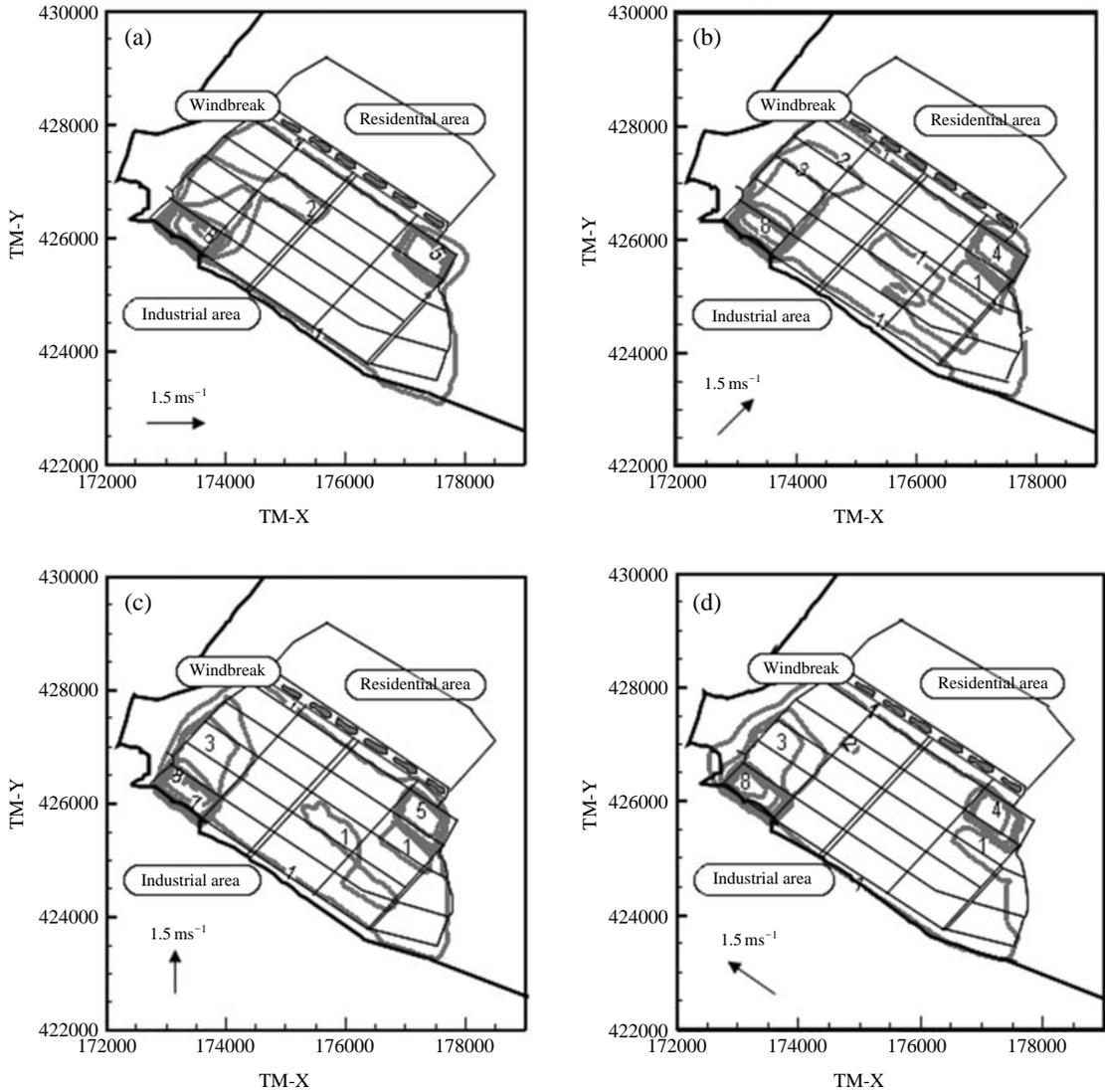


Fig. 4. Day time (2009-3-25 15:00) odor contour of low wind speed, wind directions are (a) west, (b) southwest, (c) south, (d) southeast.

나타내었다.

그림 4와 5에서는 주야간에 풍향변화에 따른 악취 영향범위를 조사하기 위하여 다른 기상인자는 고정하고 풍향만 바꾸는 경우 계산결과를 나타낸 것이다. 이들 결과는 표 1에서 나타낸 평균 배출율과 저풍속 (1.5 ms^{-1})를 사용하여 주거 단지에 영향을 줄 것으로 예상되는 4가지 풍향(서풍, 남서풍, 남풍 그리고 남동풍)에 따른 악취 등농도 곡선이다. 주간(그림 4)의

경우 풍향에 따른 등농도 곡선(OU)로 표시한 영향 범위는 서풍이 부는 경우를 제외하고는 주거지역 쪽(북쪽)으로 최대 200m까지 걸치는 것으로 나타났다. 야간(그림 5)에는 동남풍인 경우 영향범위가 주거지역으로 확장되지 않지만 서풍이 부는 경우 1,000m, 남서풍이 부는 경우 700m, 남풍이 부는 경우 1,500m까지 영향을 미친다. 서풍이 부는 경우 영향 범위가 1,000m까지 미치는 것은 주거단지가 산단 북동쪽에

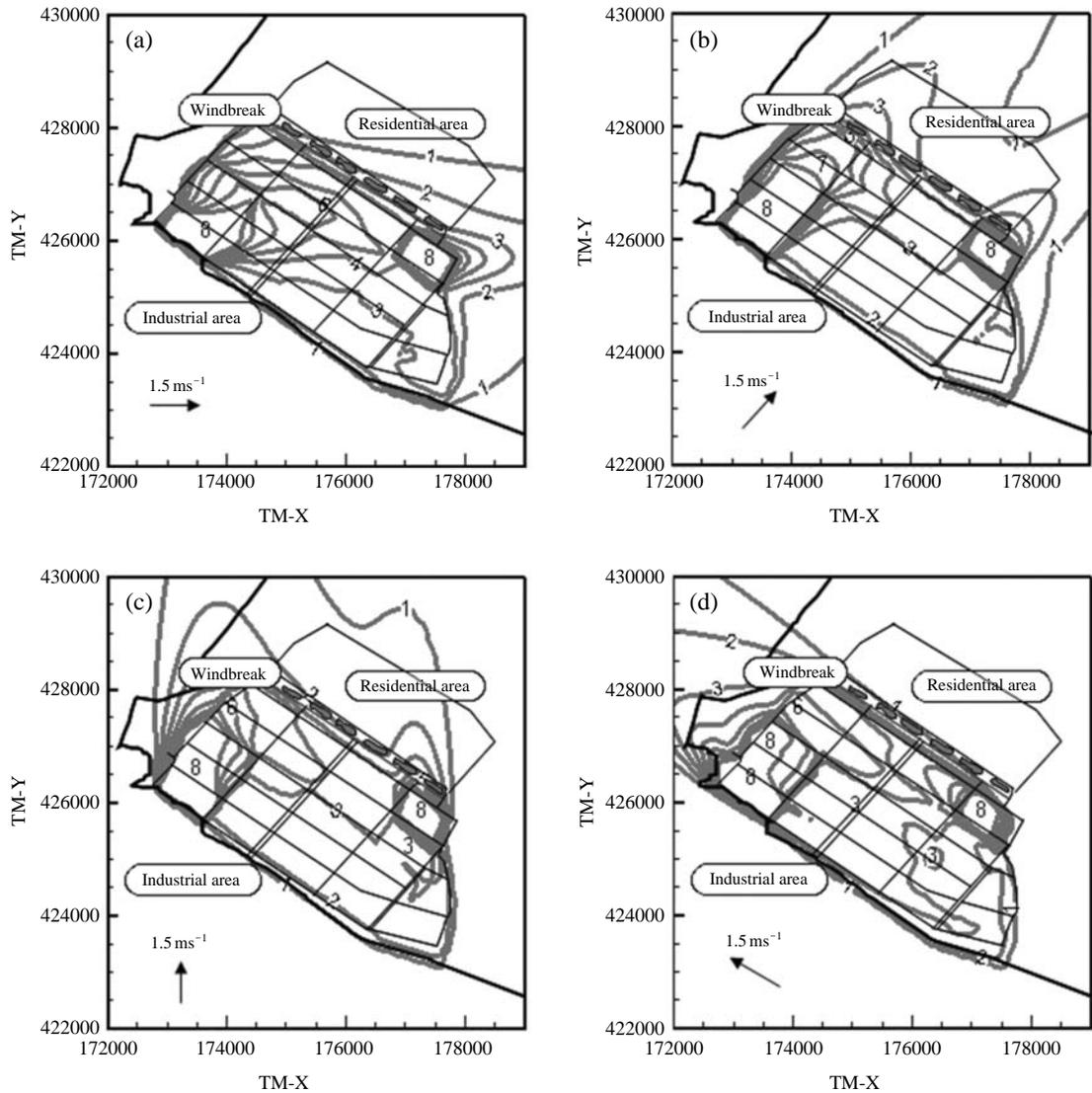


Fig. 5. Night time (2009-3-25 20:00) odor contour of low wind speed, wind directions are (a) west, (b) southwest, (c) south, (d) southeast.

위치하기 때문에 산단에 인접한 동쪽 주거단지가 주로 영향을 받기 때문이다.

이상과 같이 야간의 영향범위(최대 1,500m)가 주간 그것(최대 200m)보다 큰 것은 주야간의 안정도가 다른 것이 부분적인 원인으로 생각된다. AER-MET에서는 안정도를 Monin-Obukhov 길이(이하 M-O로 표시; M-O가 양수이면 안정 음수이면 불안

정 그리고 0이면 중립 대기임)로 나타낸다. 본 연구의 계산기간 중 주간의 MO는 -57~ -468(불안정)이었으며 야간은 120~440(안정)이었다.

그림 6과 7에서는 풍속의 변화에 따른 영향 범위 변화를 보기 위하여 남서풍이 불 때 등농도(OU) 곡선을 나타내었다. 풍속에 의한 영향 범위의 확장은 주야간의 영향범위 차이와 비교하여 적은 것으로 나

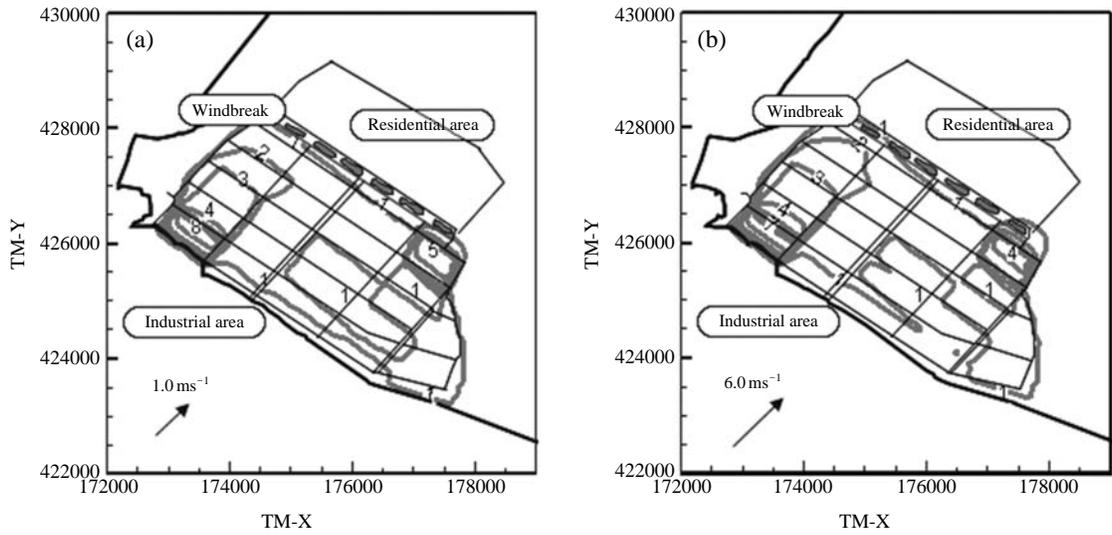


Fig. 6. Day time wind speed effect of odor concentration distribution. (a) wind speed is 1.0 ms^{-1} , (b) wind speed is 6.0 ms^{-1} .

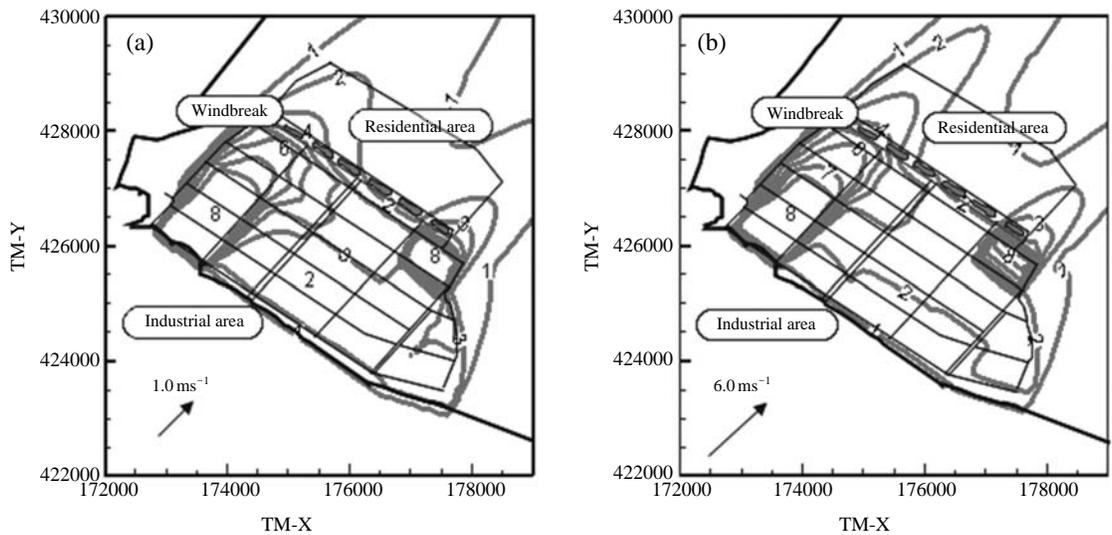


Fig. 7. Night time wind speed effect of odor concentration distribution. (a) wind speed is 1.0 ms^{-1} , (b) wind speed is 6.0 ms^{-1} .

타났다. 주간에 풍속이 1.0 ms^{-1} 에서 6.0 ms^{-1} 로 증가하는 경우 최대 100m까지 (OU=1을 기준으로 할 때) 주거지역으로 영향 범위가 확장되고(그림 6) 야간의 경우 최저 400m까지 (OU=2를 기준으로 할 때) 영향 범위 증가가 있었다(그림 7).

4. 결 론

현장 농도 관측 자료와 AERMOD 모델을 이용하여 시화 산단에서 악취 배출량을 추정하고 추정한

배출량 자료를 사용하여 산단에서 악취물질의 영향 범위를 평가한 결과 다음을 알 수 있었다.

1. 시화 산단에서 블록 별로 추정된 악취 배출율은 B5(하수종말처리장 부근)와 B20(제지단지)가 높게 나타났으며 연구 대상 산단의 배출율의 범위는 0.204에서 2.32 OUms⁻¹(평균배출율 0.476 OUms⁻¹)으로 나타났다.

2. 악취의 영향범위는 풍향과 주야간에 따라 크게 변화하였으며 주야간의 영향범위 차이는 주야간의 안정도 변화가 부분적인 원인으로 판단된다.

3. 풍속 변화에 따른 악취 영향범위는 주간에 풍속이 1.0 ms⁻¹에서 6.0 ms⁻¹로 증가하는 경우 최대 100m까지 주거지역으로 확장되고 야간의 경우 최저 400m까지 확장되었다.

4. 본 연구의 결과는 시화 산단에 설치된 방풍림의 영향을 고려하지 않은 결과로 차후 방풍림의 효과를 고려한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 2009학년도 경기대학교 학술연구비지원에 의하여 수행되었음. 본 연구를 위하여 자료를 제공해 주신 경기도보건환경연구원 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

경기도보건환경연구원 (2008) 악취민원해결을 위한 효율적 관리 방안, 심포지움 자료집.
 국립환경연구원 (2005) 악취공정시험법.
 시흥환경기술개발센터 (2008) 시흥환경기술개발센터 연구사업 최종발표 및 평가회.
 Choi, Y.J., E.C. Jeon, and K.H. Kim (2005) The emission characteristics of reduced sulfur compounds in the ban wall industrial complex, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 21(5), 515-524. (in Korean with English abstract)
 Drew, G.H., R. Smith, V. Gerard, C. Burge, M. Lowe, R. Kinnersley, R. Sneath, and P.J. Longhurst (2007) Appropriateness of selecting different averaging times for modelling chronic and acute exposure to environmental odour, *Atmos. Environ.*, 41, 2870-

2880.
 Faulkner, W.B., J.M. Lange, J.J. Powell, B.W. Shaw, and C.B. Parnell (2007) Sampler placement to determine emission factors from ground level area sources, *Atmos. Environ.*, 41, 7622-7678.
 Jeon, E.C., J.H. Sa, S.T. Kim, J.H. Hong, and K.H. Kim (2006) Odorous emissions from household-related sources: A case study on a Sewage treatment plant, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 22(3), 337-351. (in Korean with English abstract)
 Jeong, S.J. (2002) A study on separation distance between industrial source and residential areas to avoid odor annoyance using AUSPLUME model, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 18(5), 393-400. (in Korean with English abstract)
 Jeong, S.J. (2011) CALPUFF and AERMOD dispersion models for estimating odor emissions from industrial complex area sources, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 5(1), 1-7.
 Kim, J.B., S.J. Jeong, and I.S. Song (2007) The concentrations of sulfur compounds and sensation of odor in the residential area around Banwol-Sihwa industrial complex, *J. KOSAE*, 23(2), 147-157. (in Korean with English abstract)
 Mussio, P., A.W. Gnyp, and P.F. Henshaw (2001) A fluctuating plume model dispersion model for the prediction of odour-impact frequencies from continuous stationary sources, *Atmos. Environ.*, 35, 2955-2962.
 Nicell, J.A. (2009) Assessment and regulation of odor impacts, *Atmos. Environ.*, 43, 196-206.
 Rosenkrank, H.S. and A.R. Cunningham (2003) Environmental odors and health hazards, *Science of the Total Environment*, 313, 15-24.
 Sarkar, U., S.E. Hobbs, and P. Longhurst (2003) Dispersion odour: a case study with a municipal solid waste landfill site in North London, United Kingdom, *Journal of Environmental Management*, 68, 153-160.
 Sheridan, B.A., E.T. Hayes, T.P. Curran, and V.A. Dodd (2004) A dispersion modeling approach to determining the odour impact of intensive pig production units in Ireland, *Bioresource Technology*, 91, 145-152.
 Smith, R.J. (1993) Dispersion of odours from ground level agricultural sources, *J. Agric. Engng. Res.*, 54, 187-200.
 Smith, R.J. (1995) A Gaussian model for estimating odour emissions from area sources, *Mathl. Comput. Modelling*, 21(9), 23-29.
 U.S. EPA (2004) AERMOD: description of model formulation.
 Wang, L., D.B. Parker, C.B. Parnell, R.E. Lacey, and B.W.

- Shaw (2006) Comparison of CALPUFF and ISCST3 models for predicting downwind odor and source emission rates, *Atmos. Environ.*, 40, 4663-4669.
- Zou, B., J.G. Wilson, F.B. Zhan, and Y. Zeng (2009) Spatially differentiated and source-specific population exposure to ambient urban air pollution, *Atmos. Environ.*, 43, 3981-3988.