Journal of Korean Society for Atmospheric Environment
Vol. 35, No. 5, October 2019, pp. 647-657
https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.5.647
p-ISSN 1598-7132, e-ISSN 2383-5346

논 문

CALPUFF를 활용한 악취배출원별 기여율 분석에 관한 연구

A Study on the Analysis of Contribution Rate by the Odor Emission Sources Using CALPUFF

도우곤, 정우식[1),*]
부산광역시 보건환경연구원
[1)]인제대학교 대기환경정보공학과/대기환경정보연구센터

Woo-Gon Do, Woo-Sik Jung[1),*]
Busan Metropolitan City Institute of Health and Environment, Busan, Republic of Korea
[1)]*Department of Atmospheric Environment Information Engineering, Inje University, Gimhae, Republic of Korea*

접수일 2019년 9월 26일
수정일 2019년 10월 11일
채택일 2019년 10월 18일

Received 26 September 2019
Revised 11 October 2019
Accepted 18 October 2019

***Corresponding author**
Tel : +82-(0)55-320-3932
E-mail : wsjung1@inje.ac.kr

Abstract With the addition of various waste disposal facilities, Saenggok industrial complex and neighboring regions become the place where complaints regarding odour are continuously increasing in the Busan metropolitan area. In this study, in order to identify the cause of odour in these areas, the odor status was identified by measuring the complex odour and the contribution rate of each of the major emission sources to the surrounding area was calculated using the CALPUFF model. As a result of the measurement of the complex odour, complex odor exceeded the permissible emission standards at the outlet of the sludge treatment facility and some measurements at the boundary site were higher than the permissible emission standards too. The main wind directions at the individual case date are well reflected in CALPUFF modelling results and the correlation coefficient with the observed value is 0.75, showing relatively high consistency. So it is concluded that the base case modelling results reflect the odor situation in the study area relatively well. According to the analysis of contribution rates by emission source, the contribution rate of sludge treatment facilities was the highest of the four emission facilities with an average contribution rate of 76%, and high contribution rate was shown in most areas of the modelling area.

Key words: Contribution rate, CALPUFF, Saenggok industrial complex

1. 서 론

악취는 대표적인 감각공해로서 기체상 물질이 코 내부의 후각세포를 자극하여 불쾌감을 유발하는 것이며 이러한 물질들은 최소 감지농도가 낮기 때문에 낮은 농도에서도 심리적인 영향을 일으키고 있다(Capelli *et al.*, 2011). 이러한 악취의 독특한 특성은 산업단지와 인접한 주거지역이 증가하고 환경문제에 대한 시민들의 인식이 높아지면서 여러 사회, 경제적 문제를 유발하고 있다(Gostelow *et al.*, 2001). 일반적으로 악취는 심리적인 불쾌감의 원인으로 인식되고 있지만, 실질적으로는 사람의 건강에 직접적인 영향을 미치고 삶의 질을 떨어뜨리며 심하면 각종 질환 등, 건강상의 문제를 유발하기도 한다(Shusterman, 2001). 인위적인 요인으로 생성되는 악취물질은 폐기물처리 시설, 음식물 제조, 정제 시설, 매립장, 축사, 도금시설, 석유화학시설, 도축장, 종이 또는 펄프 제조시설 등의 산업화 또는 농업활동 등 매우 다양한 과정에서 발생하며 이러한 인위적인 악취물질들은 인근 지역 주민들 삶의 질을 떨어뜨리고 건강에 위해를 일으키며 결국 지역사회의 경제적인 손실을 야기하고 있다(Brancher *et al.*, 2017; Blanes-Vidal *et al.*, 2012). 그러나 대기 중의 악취물질은 다양하며 그 농도수준이 매우 낮고, 악취의 강도는 시간과 기상조건

에 따라 변화하며 악취의 인지 정도는 주관적이라서 평가와 규제가 어려운 것으로 알려져 있다(Gostelow *et al.*, 2001). 이러한 이유로 악취의 영향을 정량적으로 평가하는 것은 매우 까다로운 문제이며 악취저감을 위한 기술개발과 평가를 위한 모델링 방법개발 등 추가적인 연구의 필요성이 강조되고 있다. 악취의 규제와 저감을 위하여 세계적으로 다양한 방법과 기술들이 적용되고 있으나 복합적인 악취배출원에 대하여 악취배출량을 기반으로 지형과 기상요인을 반영한 대기확산모델의 적용은 악취문제를 평가하는 데 유용한 대안이 되고 있다(Brancher *et al.*, 2017). 대기확산모델은 주로 풍하측에서의 대기오염물질 농도를 예측하거나 또는 배출원의 풍하 방향에서 측정된 결과를 이용하여 배출원의 평균적인 배출량을 역산하는 데 많이 적용이 되고 있다(Zhu, *et al.*, 2000; Chen, *et al.*, 1998). 특히 다양한 악취배출원이 밀집되어 있는 산업단지 등을 대상으로 악취의 농도나 기여율을 평가하기 위하여 대기확산모델을 적용한 사례는 국, 내외적으로 매우 다양하다. Smith (1995)는 악취물질의 농도평가를 위하여 Gaussian 모델을 사용하였고, Mussio *et al.* (2001)은 자체적으로 개발한 확산모델을 활용하여 배출원 주변의 악취발생 빈도를 평가한 바 있다. Ranzato *et al.* (2012)은 폐기물처리장의 악취배출원을 CALPUFF 모델링과 현장검사방법으로 평가하였고 Wang *et al.* (2006)은 CALPUFF와 ISCST3 모델을 사용하여 축사에서 배출되는 악취의 확산을 평가하였다. 한편 국내에서는 Lee *et al.* (2016)이 CALPUFF 모델을 활용하여 구미공단 지역의 트리메틸아민 농도를 계산하고 전체 점오염원에 대한 개별 배출원의 기여도를 평가하였다(Lee *et al.*, 2016).

부산광역시 강서구 생곡동 일원에 위치한 생곡매립장은 1996년 최초로 매립이 시작되었으며 주변지역으로 매립가스 발전시설(2001년), 음식물 쓰레기 자원화시설(2004년), 하수슬러지 육상처리시설(2013년)과 생활폐기물 연료화시설 등의 폐기물처리시설이 잇따라 들어서면서 인접한 지역까지 생활환경의 변화와 악화가 지속적으로 진행되었고, 더욱이 최근에는 산업단지가 조성이 되고 자원순환특화단지가 입주하면서 이 일대 주변 마을은 지속적인 악취관련 민원이 제기되고 있는 대표적인 악취민원 다발지역이 되었다(KNN, 2017). 그럼에도 불구하고, 이 일대지역은 다양한 악취배출원들이 혼재해 있어 여전히 정확한 발생원 파악과 대책 수립이 어려운 실정이다.

본 연구에서는 부산광역시 생곡산업단지 인근의 주요 악취배출시설과 주변지역을 대상으로 복합악취 측정을 실시하여 이 지역에서의 악취현황을 분석하고, CALPUFF 모델을 활용하여 주요 배출원별로 주변지역에 미치는 기여율을 정량적으로 분석하였다. 이를 바탕으로 복합적인 악취배출원의 기여율을 정량적으로 평가할 수 있는 방법을 제시하고자 하였다.

2. 자료 및 방법

2.1 연구대상 지역

본 연구대상 지역은 부산광역시 강서구 생곡동 생곡산업단지 인근의 주요 폐기물처리시설들과 그 영향이 예상되는 인근의 마을 및 산업단지 일대이다. 그림 1에 나타낸 붉은 선은 본 연구에서 고려하는 주요 배출시설의 위치를 나타내고 E1에서 E3는 배출시설별 복합악취시료를 채취한 배출구의 위치를 나타낸 것이다. 또한 S1~S4는 4개의 주요 배출시설의 부지경계 악취시료를 채취한 지점들이다. 각 시설별 특성을 살펴보면 S1은 하수슬러지를 건조하여 발전소 등의 연료로 공급하는 시설이며, S2는 생활폐기물을 연료로 사용하여 전기를 생산하는 시설이다. S3는 음식물쓰레기를 처리하는 시설이며, S4는 재활용품을 선별 처리하는 시설이다. 각 시설별로 부지경계 복합악취시료는 S1~S4 각각의 위치에서 포집하였으나 재활용품을 선별 처리하는 시설의 경우 배출구가 없는 관계로 배출구의 악취시료는 E1과 E2, E3의 3개 지점에서만 채취하였다. R1~R4는 배출시설의 영향을 알아보기 위해 설정한 영향지점으로 R1은 생곡마을회관이며 R2~R4는 배출원과의 거리를 고려하여 생곡

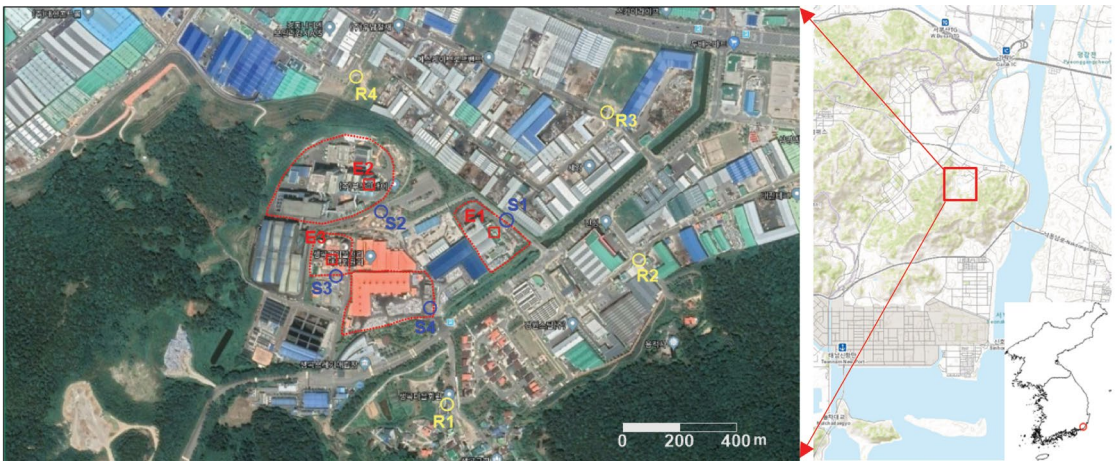

Fig. 1. Geographical map of the investigation area in Busan, Korea. The red dotted lines are the locations of the main emission sources. E1~E3 are the locations of the outlets, S1~S4 and R1~R4 are the plant and affected sites, respectively.

산업단지 내의 지점들로 선정하였다. 본 연구에서 선정한 4개의 배출시설들은 이들 지역에서 주요 악취 민원의 원인이 되는 시설들로서 관할 행정기관을 통하여 사전조사를 한 후 선정하였다.

2. 2 시료채취 및 분석

연구대상지역의 악취현황을 파악하고 CALPUFF 모델의 입력자료를 산정하기 위하여 조사지점을 대상으로 2018년 총 3회 복합악취 측정을 수행하였다. 공기시료는 흡인상자법(10-Liter Bag sampler, ACEN, Korea)으로 포집하였으며, 악취공정시험기준에 준하여 시료채취 및 분석을 실시하고 최종적으로 각 지점별 희석배수를 산정하여 악취분포를 분석하였다.

2. 3 CALPUFF 모델

그림 1에 나타낸 S1에서 S4까지의 배출원에서 배출된 악취물질이 주변지역에 미치는 기여율을 평가하기 위하여 대기확산모델링을 수행하였다. 본 연구에 사용된 CALPUFF 모델은 미국 EPA를 비롯한 국내외 여러 연구기관에서 대기오염물질 또는 악취물질의 확산 평가를 위하여 빈번하게 사용되는 모델이다(Environmental Protection Agency, 1998). CALPUFF 모델에는 복잡 지형 알고리즘, 건물로 인하여 발생하는 침강효과, 훈증효과뿐만 아니라 화학적 제거와 습식침적효과, 건식침적효과도 고려할 수 있는 특징이 있다. CALPUFF 모델은 CALMET과 CALPUFF, CALPOST의 크게 세 부분으로 구성되어 있다(Scire *et al.*, 2000). CALMET은 CALPUFF에 입력되는 3차원 온도 및 바람장 등의 격자별 기상자료를 생성하는 기상장모델이며 CALPUFF는 오염물질의 확산을 계산하는 모델이다. CALPUFF는 굴뚝에서 연속적으로 배출되는 연기가 잘게 나누어진 각각의 연기 덩어리(puff)로 배출된다고 가정하고 이 배출된 연기 덩어리가 공간적 해상도를 갖는 바람장을 따라서 이동 및 확산할 때 미치는 영향을 종합하여 농도를 계산한다(Scire *et al.*, 2000). 이러한 특징으로 CALPUFF는 점, 선, 면 오염원에 의한 지표면의 영향, 시정거리의 평가 그리고 장거리 수송 연구와 같은 광범위한 대기오염물질의 변화를 모사하는 여러 선행연구에서 적용이 되어 왔다(Ranzato *et al.*, 2012; Wanga *et al.*, 2006). 마지막으로 CALPOST는 모델결과를 시각화하는 프로그램이다. 본 연구에서는 연구 대상인 4개의 배출시설에서 배출되는 악취가 주변지역에 미치는 기여율을 분석하기 위하여 CALPUFF 모델을 활용하였고 각 배출원별 기여율은 Lee *et al.* (2016)이 사용한 방법을 활용하였다. 먼저 전체 면오염원에 의한 각 격자별 최대 예측농도를 산출

하고(Base case), 다음으로 각각의 배출원만을 입력한 모델링을 실행하여 배출원별로 최대 예측농도를 산정하였다(S1~S4 case). 이를 바탕으로 모델링 수행 대상 영역 내의 각 격자별 개별 배출원의 기여율은 S1~S4 case와 Base case의 비율로서 계산하였다(Lee *et al.*, 2016).

2.3.1 모델링 도메인 및 방법

각 배출원의 지역별 기여율 분석을 위한 CALPUFF 모델링의 도메인 구성은 그림 2와 같다. 모델링 도메인은 연구대상 배출시설을 중심으로 가로, 세로 1,400 m의 영역으로 설정하였으며 수평격자 간격은 각각 100 m로 가로, 세로 15×15개의 격자로 설정하였다. 그림에서 붉은색 사각형은 모델링 도메인에서 S1에서 S4까지의 면오염원의 위치를 의미한다.

CALPUFF 모델을 활용한 각 배출원별 기여율 분석 과정은 그림 3과 같다. 먼저 CALPUFF에 입력되는 악취배출량은 복합악취 조사 결과를 바탕으로 배출원별 면오염원 배출량을 산정하여 모델에 입력하였다. 기상입력자료는 복합악취 관측일을 대상으로 3차원 기상장모델인 WRF를 수행하고 그 결과를 기상자료 전처리 프로그램인 CALMET에 입력하여 생성하였다. 개별배출원의 기여율 분석은 Lee *et al.* (2016)이 사용한 방법을 활용하였는데 먼저 악취측정을 실시한 3개의 사례일에 대하여 본 연구에서 고려하고 있는 4개의 면오염원을 입력하여 각 격자별 최대 예측농도를 산출하였다(Base case). 또한 Base case의 결과를 활용하여 부지경계(S1~S4)와 영향지점(R1~R4)에서의 복합악취 측정결과와 비교하여 모델의 재현성을 평가하였다. 다음으로 각각의 배출원만을 입력한 모델링을 실행하여 배출원별로 격자별 최대 예측농도를 산정하였다(S1~S4 case). 최종적으로 각 격자별 개별배출원의 기여율은 S1~S4 case와 Base case의 비율로서 계산하였다(Lee *et al.*, 2016).

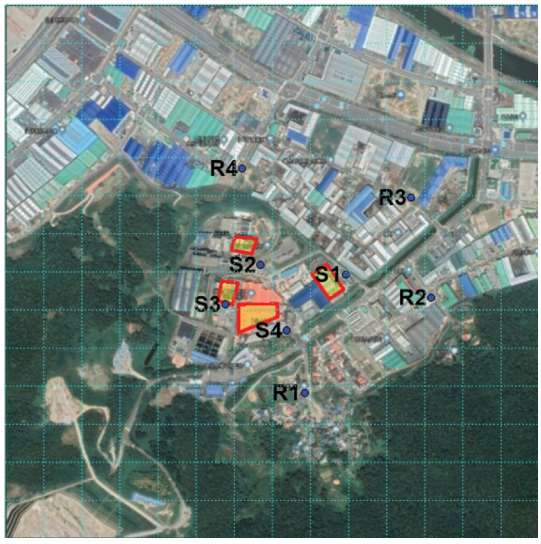

Fig. 2. Geographical map of modeling domain including locations of 8 sampling sites and 4 area sources, S1 to S4 and R1 to R4 are the locations of complex odor sampling sites used for model result verifications. The red rectangles are the locations of area sources considered in this study.

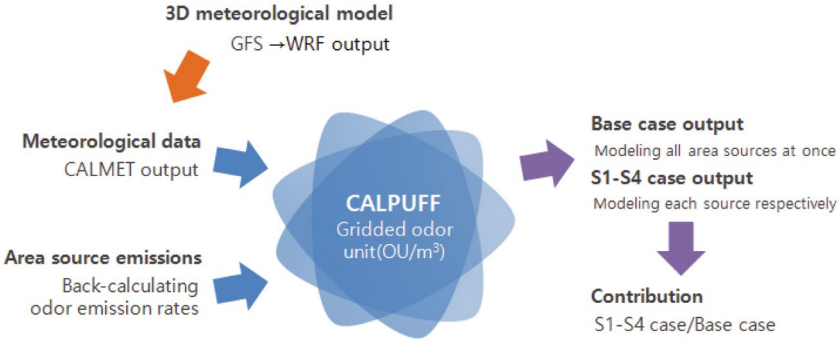

Fig. 3. The schematic diagram for modeling process in this study.

2.3.2 배출량 및 기상입력 자료

CALPUFF 모델을 활용하여 악취모델링을 수행하기 위해서는 모델링 대상이 되는 배출원의 악취배출량 자료가 도출되어야 한다. 본 연구에서 고려하고 있는 배출시설에서의 악취배출 형태는 두 가지 유형으로 구분할 수 있는데 하나는 특정한 배출구를 통해 오염원이 배출되는 경우로 점오염원에 해당이 되며, 다른 하나는 특정한 배출구 없이 배출시설 전체에서 대기 중으로 발산되는 면오염원으로 구분할 수 있다. 점오염원의 경우 배출시설별 전체 배출구에 대한 복합악취 측정결과와 각 배출구의 제원과 배출가스에 대한 정보가 필요하나 본 연구에서는 대표적인 배출구만을 대상으로 측정이 이루어져 입력자료 구성에 어려움이 있었다. 그리고 현장측정 당시 각 배출시설들에서 감지되는 악취가 배출구뿐만 아니라 공정별 시설 전체에서 배출되는 것으로 확인되어 각 배출시설 전체를 면오염원으로 설정하여 입력자료를 구성하는 것이 현실적으로 타당한 것으로 판단되었다. 모델 입력을 위한 면오염원 악취배출량은 단위면적과 시간에 대한 악취발생량, 그리고 대상 배출시설의 면적으로 산출할 수 있는데 각 배출시설의 악취발생량은 실측에 어려움이 상당부분 존재하므로 배출시설 인근에서 측정된 농도를 이용하여 간접적으로 계산할 수 있다(Back-calculating Odor Emission Rates). 이를 활용하여 배출시설 인근의 악취농도를 C_2라 하면, 이에 상응하는 배출량 Q_2는 다음 식으로 구할 수 있다(Wang *et al.*, 2006; Jeong, 2011).

$$\frac{Q_1}{Q_2}=\frac{C_1}{C_2}$$

여기서 Q_1은 초기 악취발생량 값이며 C_1은 같은 지점에서의 초기 모델링 결과에 따른 악취농도를 의미한다. 본 연구에서도 이러한 방식을 활용하여 총 3회에 걸쳐 각 배출시설에의 부지경계에서 측정한 복합악취 농도와 기상조건을 CALPUFF 모델에 입력하여 각 측정기간에 대한 악취발생량을 산정하였고, 그 결과는 표 1과 같다.

Table 1. Calculated emission rates of each area source at each measurement day. (unit: OU/m^{2}s)

	10 Jul.	18 Sep.	14 Nov.	Mean	Max.
S1	8.9	7.1	5.0	7.0	8.9
S2	2.4	1.3	1.4	1.7	2.4
S3	9.9	12.9	9.6	10.8	12.9
S4	2.3	2.1	3.5	2.6	3.5

본 연구에서는 이들 배출시설이 배출한 악취물질이 주변지역의 악취정도에 미치는 최대의 기여율 파악이 주요 목적이므로 악취 발생량의 최대값을 적용하여 CALPUFF 모델링을 수행하였다.

CALPUFF 모델에 사용되는 기상입력자료는 악취측정을 실시한 3개 사례일에 대하여 WRF (Weather Research and Forecasting) 모델링을 수행하여 모델링 도메인을 포함하는 3차원 기상장을 계산하고 이를 CALMET에 적용하여 생성하였다. 본 연구에서는 WRF Version 3.4.1을 이용하고 기상장의 정확도를 확보하기 위해서 자료동화(Four Dimensional Data Assimilation, FDDA) 기법을 적용하였으며 초기 기상장은 미국의 NCEP에서 생성되는 GFS 자료를 사용하였다. WRF 모델의 도메인은 4단계의 둥지격자 체계로 구성하였으며 동아시아 27 km 격자영역, 한반도 9 km 격자영역, 다음으로 각각 3 km 격자영역과 1 km 격자영역으로 구성하였다. 또한 연직방향으로는 15개의 층으로 설정하였다. WRF 모델의 물리 옵션과 초기자료 구성 등 모델운영에 관한 사항은 Na *et al.* (2019)에 제시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 측정일자별 기상 특성

본 연구대상 지역에 위치한 주요 배출시설 및 영향지점에서의 악취현황을 파악하기 위하여 총 3회에 걸쳐 복합악취 측정을 실시하였다. 측정 일자는 악취민원이 집중되는 여름에서 가을(7월에서 11월) 중 7, 9, 11월을 대상으로 강수가 없고 풍속이 약한 날을 선

정하여 7월 10일, 9월 18일, 11월 14일로 비교적 일정한 간격을 유지하였다. 조사당시 각 지점별로 기상요소를 측정하였으며 일자별 기상요소들의 평균값은 표 2와 같다.

3. 2 악취발생 특성

본 연구대상 시설의 배출구와 부지경계, 영향지점에서의 복합악취 측정결과는 표 3에 제시하였으며 측정단위는 희석배수와 같다. 출구에서의 희석배수 평균은 210.0에서 656.7배의 수준을 보였으며 E1에서 평균 656.7배로 가장 높게 나타났다. E1 지점의 개별 측정값은 557에서 965배로 모두 기타지역 배출허용기준(500배 이하)을 넘어서고 있으며 다른 지점과도 상당한 차이를 보이고 있어 연구대상 지역의 주요 악취발생원으로 분석되었다. 각 배출시설의 부지경계(S1~S4)에서 복합악취 평균은 7.0에서 17.0배의 수준으로 나타났는데, 배출구 측정결과와 동일하게 S1에서 17.0배로 가장 높게 나타났다. S1 지점에서 가장 높은 복합악취 평균값이 나타난 것은, 7월과 9월 측정값이 기타지역 복합악취배출허용기준(15배 이하)을 넘어서는 측정값인 '20배'를 나타내면서 평균값이 크게 증가하였기 때문으로 분석된다. 또한, 이 지점에서는 11월 4일의 측정값을 제외하고는 다른 지점들(S2~S4)에 비해 월등히 높은 복합악취 측정값이 나타나서, 연구대상 지역에서의 주요 악취발생원임을 다시 한번 알 수 있었다. 영향지점(R1~R4)에서의 복합악취 평균은 3.3에서 9.0배의 수준으로 나타나 영향지점 모두 배출허용기준을 만족하였으나, 배출시설의 북쪽에 위치한 R4 지점이 다른 나머지 3개 지점에 비해 가장 높게 나타났다. R4 지점의 일자별 측정결과를 보면 9월 측정시에 14의 희석배수값을 보여 다른 지점들보다 높게 나타나면서 평균값이 증가한 것으로 판단된다. 9월 18일 측정당시 R4 지점에서 S1 지점과 유사한 냄새를 확인할 수 있었으며 이날은 다른 측정일과 달리 남동풍 계열의 풍향임을 감안하면(표 2) E1에서 배출되는 악취가 풍상측에 위치한 R4

Table 2. Meteorological conditions at each sampling date.

Date	Temperature (°C)	Wind direction (deg)	Wind speed (m/s)	Relative humidity (%)	Pressure (hPa)	*Daily mean cloud (1/10)
16 Mar.	7.3	N	0.2	48.5	1025	6.4
10 Jul.	29.5	NW	1.1	68.4	1015	7.8
18 Sep.	27.8	SE	1.6	68.0	1013	4.3
14 Nov.	16.5	NE	1.0	51.3	1021	1.1

*Busan regional meteorological observatory (Korea Meteorological Administration, 2018)

Table 3. An overall summary of complex odor measured at sampling sites in this study. (unit: dilution value)

	10 Jul.	18 Sep.	14 Nov.	Mean	Emission standard	
					Insustrial area	Other area
E1	965	557	448	656.7	1,000	500
E2	249	208	173	210.0		
E3	–	208	300	254.0		
S1	20	20	11	17.0	20	15
S2	10	5	6	7.0		
S3	14	8	10	10.7		
S4	11	11	14	12.0		
R1	4	5	3	4.0		
R2	4	4	5	4.3		
R3	3	4	3	3.3		
R4	8	14	5	9.0		

지점에 영향을 준 것으로 판단된다. E1의 영향은 S4 지점에서도 한 번 더 확인할 수가 있는데 11월 측정 시 E1의 남서쪽에 위치한 S4 지점의 희석배수가 14로 다른 지점들과 비교하여 가장 높게 나타났는데, 이날도 S4 지점 측정 당시 E1과 비슷한 냄새를 확인하였으며 북동풍 계열 바람의 영향으로 E1에서 배출되는 악취가 영향을 미친 것으로 판단된다. 연구대상 지역의 지점별 복합악취 분석결과 배출구와 부지경계에서 배출되는 악취는 확산되면서 농도가 약해지지만 기상조건에 따라 주변지역에 영향을 주는 것이 일부 확인되었으며 일자별 측정결과를 비교하면 봄, 가을보다 여름철에 높게 나타나는 것을 알 수 있었는데 이는 기존의 연구결과와도 일치하였다 (Kim *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2007).

3. 3 모델의 적합성 검증

본 연구에서 고려하고 있는 주요 배출시설 4개소가 연구대상지역 주변에 미치는 영향을 파악하기 위하여 CALPUFF 모델을 활용하였다. 악취측정 대상일에 대한 WRF 기상장 수치모델링을 수행하고, 본 연구에서 산정한 주요 배출원 4개소의 면오염배출량을 입력하여 CALPUFF 모델링을 수행하였다. 사례일별 수행된 모델의 적합성을 검증하기 위하여 배출시설의 부지경계 (S1~S4)와 영향지점 (R1~R4)에서 측정한 복합악취 결과를 동일한 지점의 모델링 결과와 비교하였다. 배출원별 기여율 산정을 위하여 먼저 전체 4개의 면오염원을 입력하여 현황모델링을 수행하고 (Base case) 다음으로 각각의 배출원만 단독으로 입력하여 모델링을 수행하였다 (S1~S4 case). 이를 바탕으로 각 배출원이 모델링 도메인 내 격자별로 미치는 상대적인 기여도 (%)는 개별 오염원에 의한 예측농도 (S1~S4 case)/전체오염원에 의한 예측농도 (Base case) × 100으로 계산할 수 있다. 그림 4는 각 일자별 Base case 모델의 결과와 ((a)~(c)) 측정지점에서 모델값과 측정값의 상관도 (d)를 나타낸 그림이다. 7월 10일의 Base case 모델링 결과 (그림 4a)를 살펴보면, 최대 희석배수는 279로 배출원의 (회색 도형) 주변과 남쪽 방향에 위치한 격자를 중심으로 높은 값이 나타나고 있다. 관측값과의 상관계수는 0.90로 상당히 높은 일치도를 보이는 것을 알 수 있다. 9월 18일의 모델링 결과 (그림 4b)를 보면, 최대 희석배수는 52로 나타났는데, S1 배출원과 인접한 격자에서 가장 높은 값을 보이고 있으며, 이외에도 비교적 높은 희석배수값은 배출원을 중심으로 나타나는 경향을 보인다. 하지만, 3개의 사례일 중에서는, 다른 사례일에 비해 비교적 낮은 관측값과의 상관계수 (0.68)를 나타냈다. 11월 4일의 모델링 결과 (그림 4c)에서는 다른 두 사례일과 달리, 배출원 주변 일부를 제외하고는, 모델링 영역 대부분의 지점에서 악취가 나타나지 않는 것으로 계산되었다. 즉, 영역 내에서 최대 희석배수는 S1 배출원과 인접한 격자에서 104로 나타났고, 나머지 0 이상의 계산값 또한 배출원의 남쪽 및 남서쪽 방향의 격자에서 대부분 나타나고 있다. 이러한 경향적 분포는 기상관측결과 (표 2)에서 나타난 바와 같이, 이날의 주풍향인 북동 (NE)풍의 영향으로 악취도의 분포가 배출원의 풍하방향인 남쪽방향 또는 남서쪽방향으로 확산된 것으로 판단할 수 있다. 이 사례일에서는 관측값과의 상관계수가 0.76으로 나타났다. 이상의 결과에서 살펴본 바와 같이, 전반적으로, 3개의 사례일 전체에 대한 모델링 결과와 관측값과의 상관계수가 0.75로 높게 나타나서 CALPUFF 모델을 활용한 복합악취 예, 진단 및 현황분석 있어 본 연구의 결과가 상당히 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 4 배출원별 기여율 분석

그림 5는 3개 사례일에 대한 각 배출원별 기여율 평균을 격자별로 나타낸 것이다. S1 지점 (그림 5a)은 복합악취 측정 평균이 16.3으로 다른 지점들보다 높고 부지경계 배출허용기준 초과가 2번이나 발생한 지역으로 악취발생량이 많은 지역이다. 영역 전반에 걸쳐 기여율은 최소 18.2%부터 최대 97.1%로 나타났으며 영역의 전체 평균은 76.0%로 다른 배출원들에 비해 상당히 높은 기여율을 보이고 있다. 지역별 분

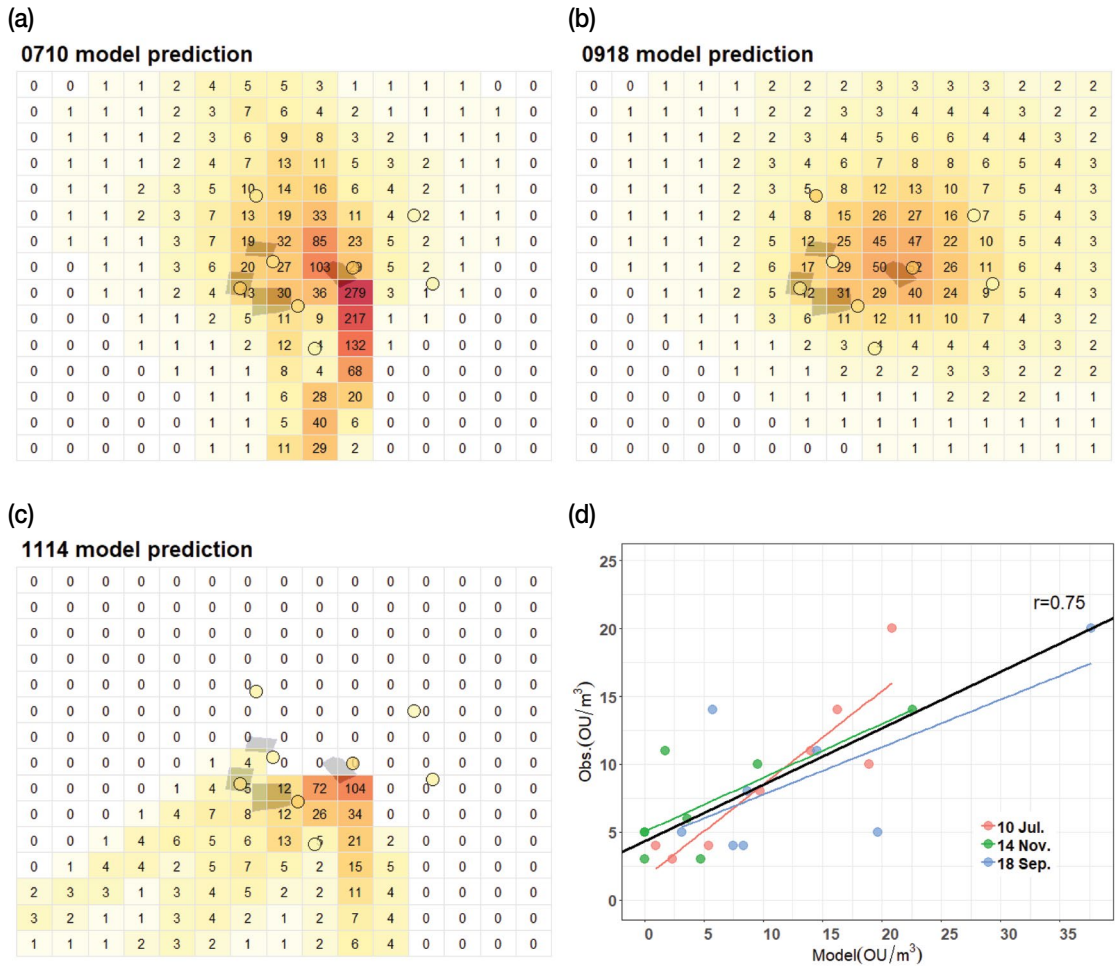

Fig. 4. Base case model results with odor observation value and comparison of the model results and observed complex odor at each site by dates. Grey rectangles denote the location of the emission sources.

포를 자세히 살펴보면, 배출시설이 위치한 격자에서 상대적으로 높은 경향을 보이고 있으며, 영역의 오른쪽 지역에서 80% 이상의 기여율이 나타나고 있다. 또한 배출원의 서쪽 일부지역에 비교적 낮은 기여율을 보이고 있으나 전반적으로 전 영역에 걸쳐 높은 기여율을 보이는 것을 다른 지점들의 결과와 비교하면 비교적 뚜렷이 알 수 있다. 즉, 다른 배출원들과 비교하여 연구대상지역에 높은 기여율을 보이는 악취배출원으로 판단된다. S2 지점(그림 4b)은 측정된 복합악취 평균이 6.8로 연구대상 중 가장 낮은 악취발생량을 보였던 시설이 위치한 곳으로, CALPUFF 모델링 결과에서도, 영역 전체의 평균 기여율이 4.9%이고, 각 격자별로 최소 0%에서 최대 42.7%의 기여율을 나타내서 연구대상 배출시설 중에서 가장 낮은 악취기여율 결과를 나타냈다. 악취배출시설이 위치한 지역에서 상대적으로 높은 기여율이 나타났고 이 시설들의 서쪽 방향으로 높은 기여율 분포가 나타났다. S3 지점(그림 4c)의 결과를 보면, 전체 평균 기여율은 7.3%이며 최소 0.4%, 최대 41.0%의 기여율을 보여 S2 지점과 비슷한 수준의 기여율을 나타냈다. 지역별로는 배출원과 인접한 서쪽 일부지역을 중심으로 다른 지역에 비해 다소 높은 기여율이 나타났으며 배출원의 남쪽영역에

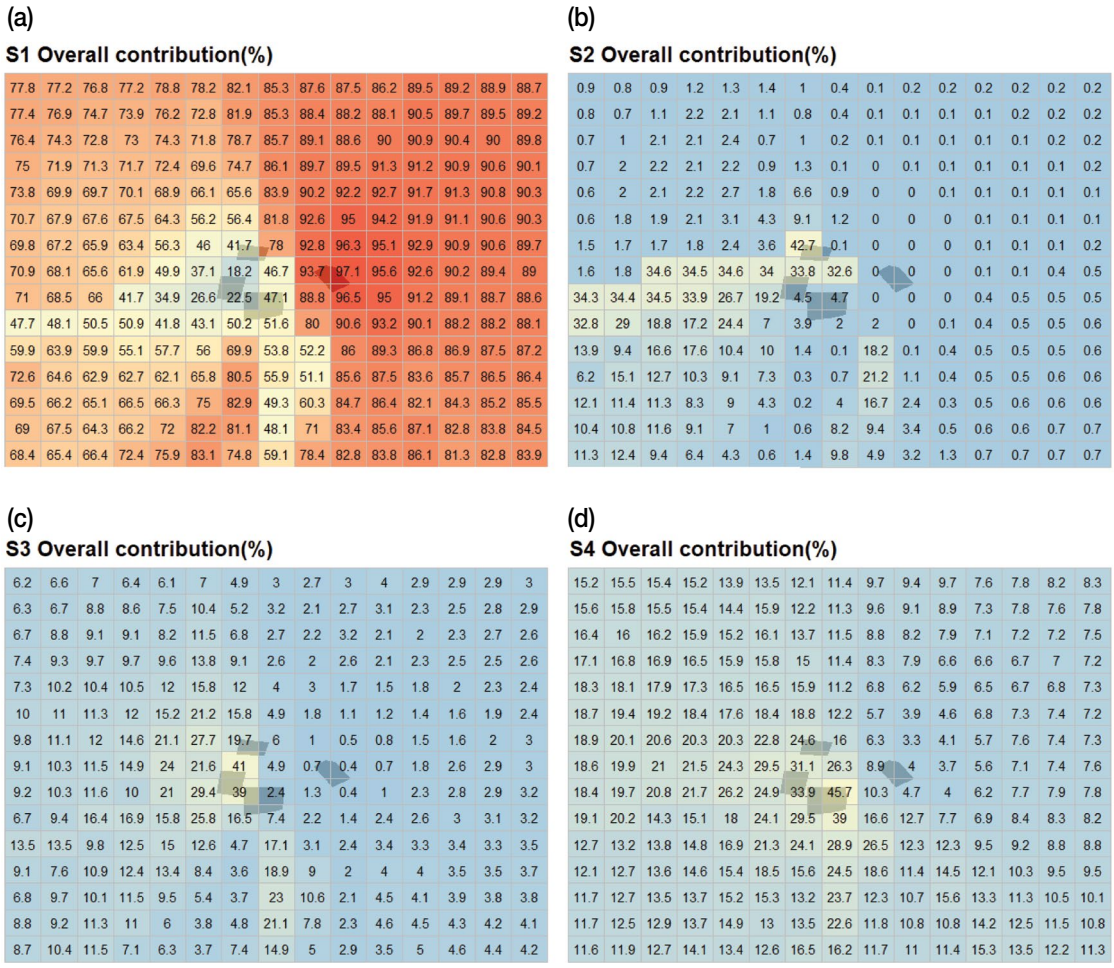

Fig. 5. Grid distribution of average contribution rate by 4 major emissions (S1~S4) in the modeling domain. Gray rectangles show the location of each area source.

서도 주변보다 높은 기여율을 보이고 있다. S4 지점(그림 4d)의 결과에서는 부지경계에서 측정한 복합악취 측정결과의 평균이 9.8로써 4개의 지점들 중에서 두 번째로 높았으며 영역 전체의 평균 기여율은 13.6%, 최소 기여율은 3.3%, 최대 기여율은 45.7%로 나타나서 S1 다음으로 높은 평균 기여율을 보였다.

이상의 4개의 지점들을 대상으로 CALPUFF 악취 모델링을 수행하여 연구대상 배출원의 악취기여율을 산정한 결과 S1 배출원이 모델영역에서 평균 76%의 기여율로 가장 높게 나타났으며 모델링 영역 대부분의 지역에서 높은 기여율이 나타나고 있었고 다른 3곳의 배출원들(S2~S4)은 평균 약 10% 수준의 기여율을 나타내었다. 또한 배출원 일대에서 높은 경향과 서쪽 및 남쪽으로 다소 높은 수준의 기여율이 나타나는 경향을 볼 수 있었다.

4. 결론 및 제언

생곡산업단지와 인근 지역은 다양한 폐기물처리시

설이 혼재해 있고 최근에는 산업단지가 추가되면서 부산광역시 내에서 악취관련 민원이 지속적으로 발생하는 지역이다. 본 연구에서는 생곡산업단지와 인근 지역에 대한 악취의 원인을 규명하기 위하여 복합악취 측정으로 악취현황을 파악하고 CALPUFF 모델을 이용하여 주요 배출원 각각이 주변지역에 미치는 기여율을 계산하였다. 조사대상 지점은 주요 배출원의 배출구 3개 지점, 부지경계 4개 지점, 영향지점 4개 지점, 총 11개 지점이며 부지경계에서 측정된 복합악취 측정자료를 바탕으로 개별 배출원의 면오염원 배출량을 계산하였다. 악취시료채취와 분석은 악취공정시험기준에 준하여 실시하였으며 측정 일자는 2018년 7월 10일, 9월 18일, 11월 4일, 총 3회로 악취에 의한 민원발생 가능성 및 이류, 확산이 증대되는 여름부터 가을에 걸치는 계절을 중심으로 실시하였다. 복합악취 측정결과 슬러지처리시설의 배출구에서 전체 측정기간 동안 기타지역 배출허용기준을 초과하였으며 이 시설의 부지경계에서도 일부 측정치가 기타지역 배출허용기준 넘어서는 수준을 나타냈다. 또한 배출구와 부지경계에서 배출되는 악취는 확산되면서 농도가 약해지지만 기상조건에 따라 주변지역에 영향을 준다는 것을 알 수 있었다. 연구대상지역의 배출시설 4개소가 연구대상지역 주변에 미치는 영향을 파악하기 위하여 CALPUFF 모델을 활용하였다. 복합악취 측정일을 대상으로 4개 배출원의 면오염원 배출량을 입력하여 모델링을 수행한 결과, 희석배수는 개별 사례일의 주풍향을 잘 반영하고 있으며 부지경계 및 영향지역의 복합악취 관측값과의 상관계수가 0.75로 전반적으로 높은 일치도를 보여 모델의 결과를 복합악취 현황 자료로 사용하기에 무리가 없을 것으로 판단되었다. 현황 모델링 결과와 개별 배출원의 모델링결과의 비율로 계산된 각 배출원별 기여율을 분석한 결과 슬러지 처리시설의 기여율이 모델영역에서 평균 76%로 가장 높게 나타났으며 모델링 영역 대부분의 지역에서 높은 기여율이 나타나고 있었다. 나머지 배출원들은 평균 약 10% 기여율이었으며 배출원과 인접한 서쪽 및 남쪽지역에 다른 지점들보다 다소 높은 기여율을 보이고 있다. 본 연구결과를 참고하여 생곡마을과 인근 지역의 효과적인 악취저감을 위한 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다(No.2017R1D1A3B03036152).

References

Blanes-Vidal, V., Suh, H., Nadimi, E.S., Løfstrøm, P., Ellermann, T., Andersen, H.V., Schwartz, J. (2012) Residential exposure to outdoor air pollution from livestock operations and perceived annoyance among citizens, Environment International, 40, 44-50, https://doi.org/10.13031/2013.41637.

Brancher, M., Griffiths, K.D., Franco, D., de Melo Lisboa, H. (2017) A review of odour impact criteria in selected countries around the world, Chemosphere, 168, 1531-1570, https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.160.

Capelli, L., Sironi, S., Del Rosso, R., Centola, P., Rossi, A., Austeri, C. (2011) Olfactometric approach for the evaluation of citizens' exposure to industrial emissions in the city of Terni, Italy, Science of the Total Environment, 409, 595-603, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.10.054.

Chen, Y.C., Bundy, D.S., Hoff, S. (1998) Development of a model of dispersion parameters for odor transmission from agricultural sources, Journal of Agriculture Engineering Research, 69, 229-238, https://doi.org/10.1006/jaer.1997.0247.

Environmental Protection Agency (1998) Interagency workgroup on air quality modeling (IWAQM) phase 2 summary report and recommendations for modeling long-range transport impacts.

Gostelow, P., Parsons, S.A., Stuetz, R.M. (2001) Odour measurements for sewage treatment works, Water Research, 35, 579-597, https://doi.org/10.1016/s0043-1354(00)00313-4.

Jeong, S.J. (2011) Estimation of odor emissions from industrial

sources and their Impact on residential areas using the AERMOD dispersion model, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 27(1), 87-96, https://doi.org/10.5572/KOSAE.2011.27.1.087.

Kim, J.B., Jeong, S.J., Song, I.S. (2007) The concentrations of sulfur compounds and sensation of odor in the residential area around Banwol-Sihwa industrial complex, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 23(2), 147-157, https://doi.org/10.5572/KOSAE.2007.23.2.147.

Kim, K.Y., Kang, B.W., Yeon, I.J., Song, C., Jung, J.S. (2016) A study on the odor compounds emitted from cement and lime manufacturing plant using odor contribution analysis, Journal of Korean Society of Environmental Technology, 17(4), 340-352, https://doi.org/10.15250/joie.2017.16.1.1.

KNN (2017) http://www.knn.co.kr/129541.

Lee, E.J., Khan, M., Lim, K.H. (2016) Odor modeling of trimethyl amine in Gumi National Industrial Complex, Korean Chemical Engineering Research, 54(2), 187-199, https://doi.org/10.9713/kcer.2016.54.2.187.

Na, H., Jung, W.S., Park, J.K. (2019) A study on the characteristics of maximum wind speed distributions by typhoon track in the Korean Peninsula, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 35(1), 36-48, https://doi.org/10.5572/kosae.2019.35.1.036.

Ranzato, L., Barausse, A., Mantovani, A., Pittarello, A., Benzo, M., Palmeri, L. (2012) A Comparison of Mehods for the Assessment of Odor Impacts on Air Quality: Field Inspection (VDI3940) and the Air Dispersion Model CALPUFF, Atmospheric Environment, 61, 570-579, https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.08.009.

Scire, J.S., Strimaitis, D.G., Yamartino, R.J. (2000) A user's guide for the CALPUFF dispersion model (Version 5.0), Earth Tech, Inc., Concord, MA.

Shusterman, D. (2001) Odor-associated health complaints: competing explanatory models, Chemical Senses, 26, 339-343, https://doi.org/10.1093/chemse/26.3.339.

Smith, R.J. (1995) A Gaussian model for estimating odour emissions from area sources, Mathematical and Computer Modelling, 21(9), 23-29, https://doi.org/10.1016/0895-7177(95)00048-7.

Wang, L., Parker, D.B., Parnell, C.B., Lacey, R.E., Shaw, B.W. (2006) Comparison of CALPUFF and ISCST3 models for predicting downwind odor and source emission rates, Atmospheric Environment, 40, 4663-4669, https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.04.043.

Zhu, J., Jacobson, L.D., Schmidt, D.R., Nicolai, R. (2000) Evaluation of INPUFF-2 model for predicting downwind odors from animal production facilities, Applied Engineering in Agriculture, 16(2), 159-164, https://doi.org/10.13031/2013.5068.

Authors Information

도우곤 (부산광역시 보건환경연구원 연구사)
정우식 (인제대학교 대기환경정보공학과/대기환경정보연구센터 교수)