대기확산시뮬레이션 중첩분석을 통한 부산·울산 악취피해영향범위 연구

Overlapping Analysis of Air Dispersion Simulation for Odor Damage to Estimate the Effect Area in Busan and Ulsan, South Korea

김소영* · 권혜옥**

Kim, Soyoung*, and Kwon, Hye-Ok**

Abstract

Busan and Ulsan, representative industrial cities in South Korea, have been exposed of hazardous chemical accidents. For this reason, people who live in those areas are enormously interested of the corresponding response. The chemical incidents may cause serious odor and hazardous impacts on neighborhood and surrounding area. The dispersion simulation is the most useful tool for estimating the effect distance of odor or chemical accident. The other studies, there are almost focused on each simulation results using ALOHA, AERMOD, and CALPUFF. The significant problem of these dispersion simulation for this purpose is that they have own advantages and disadvantages. Even though these limitation of each simulation, overlapping analysis has not been studied yet. Therefore, we investigated the overlapping analysis of three simulation outputs by the case study of gas odor accident in the Busan and Ulsan area on July 2016.

Key words : Dispersion Simulation, ALOHA, AERMOD, CALPUFF, Stationary Source, Mobile Source, Odor, Busan, Ulsan

요 지

우리나라 대표적인 산업·공업도시인 부산과 울산은 특히 주거지역과 산업·공업단지가 가까이 위치하고 있어 다양한 형태로 악취 및 유해화학물질 사고에 노출되어 있다. 이로 인해 화학물질로 인한 사고발생시 정확한 피해영향범위를 예측하고 대응을 위한 주민들의 관심과 대책을 요구 받는다. 선행연구들을 검토한 결과, ALOHA, AERMOD, CALPUFF와 같이 단일 대기확산시뮬레이션을 이용한 환경영향 예측 연구 결과가 대부분이다. 이러한 경우, 각각의 대기확산시뮬레이션 장·단점에 의해 결과해석의 오류가 발생할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 2016년 7월 부산과 울산지역에서 동시다발적으로 민원이 접수되었던 가스냄새악취 원인조사사례를 적용하여 세가지 대기확산시뮬레이션을 활용한 사고발생시 피해영향범위 예측을 위한 대기확산 시뮬레이션 중첩분석을 수행하였다.

핵심용어 : 대기확산시뮬레이션, ALOHA, AERMOD, CALPUFF, 고정오염원, 이동오염원, 악취

1. 서 론

최근 국내에서는 삶의 질의 향상과 쾌적한 환경에서 생활하고자 하는 욕구가 높아짐에 따라 산업·공업단지를 포함

하여 주거지역 주변에 위치한 다양한 시설로 인하여 유발되는 악취와 관련된 민원이 급증하고 있다. 한국은 협소한 국토면적 및 산업화에 따라 도시의 형태가 변화하면서 산업단지 및 환경기초시설과 같은 다양한 악취배출원이 주거지

*정회원, 행정안전부 국립재난안전연구원 박사(E-mail: soyykim@korea.kr)

Member, Ph.D., National Disaster Management Institute, Disaster Scientific Investigation Division(DSI)

**교신저자, 정회원, 행정안전부 국립재난안전연구원 박사(Tel: +82-52-928-8290, Fax: +82-52-928-8299, E-mail: lunakwon83@korea.kr)

Corresponding Author, Member, Ph.D., National Disaster Management Institute, Disaster Scientific Investigation Division(DSI)

역과 인접·혼재하는 형태를 보이며, 악취 민원이 점차적으로 증가하고 있는 실정이다(Kil, 2009; Park, 2011). 악취오염은 대부분 주민 민원제기에 의해 표면화되고, 악취유발물질이 축적되지는 않지만 그 피해가 광범위하게 나타나는 경향을 보인다(Song et al., 2003). 또한 감각공해인 악취유발물질의 확산은 가시화되지 않으므로 거동을 쉽게 파악할 수 없으며 악취에 대한 객관적인 분석수단 또한 분명하지 않다. 그러므로 민원 발생 건수의 변화 추이는 전체적인 악취정도에 대한 상당한 시사점을 제공한다(Kim and Cho, 2009; Lee, 2012). 그럼에도 불구하고 대기 중으로 배출되는 악취유발물질이 주변지역으로 확산되는 정도와 그 피해영향범위 예측을 산정하는 것에 대해서는 정보 및 연구가 부족하다. 화학사고가 발생을 하게 되면 위험피해영향범위예측 뿐 아니라 화학물질 자체가 가지는 악취가 유발될 수 있으므로 악취피해영향범위 예측 연구는 화학사고 피해영향범위 예측 연구와 동일한 맥락에서 다루어진다.

국내 대규모 화학공단이 조성되어있는 울산, 여수, 서산 등의 지역에서는 다양한 유해화학물질을 취급하고 있으며, 유해화학물질을 취급하는 공정은 복잡하고 강한 유독성으로 인한 사고가 발생할 가능성이 매우 높다(Lee et al., 2012). 화학사고 유형은 크게 누출, 폭발, 화재로 나눌 수 있다(Crowl and Louvar, 2001). 화학사고는 누출로 인한 폭발, 폭발로 인한 화재, 누출로 인한 화재 등 짧은 시간에 큰 피해를 발생 시킬 수 있고, 복잡한 형태로 발생하게 된다. 특히 화학사고는 유해화학물질이 기상상황에 따라서 대기 중으로 확산되어 산업시설 내 작업 중인 근로자뿐만 아니라 인근 주거지역에 거주하는 주민에게도 치명적인 피해를 입힐 수 있다(Lee et al., 2015). 따라서 대기확산시뮬레이션을 이용한 화학사고 및 악취 피해영향범위예측을 위한 연구가 필요하다(Oh et al., 2011; Song and Yang, 2017). 매순간마다 변화하는 온도, 풍향, 풍속 등의 기상조건과 대기 중으로 배출되는 오염물질이 지형의 각종 영향인자들에 의해 주변으로 퍼져나가기 때문에 유해화학물질 확산현상을 완전하게 추적하는 것은 한계가 있다. 그러므로 대기환경에 따른 유해화학물질의 물리·화학적 과정을 정량적으로 분석하고 오염도를 평가할 수 있는 도구로 대기확산시뮬레이션을 활용하는 방법이 있다. 대기확산시뮬레이션 결과는 대기 오염물질 혹은 유해화학물질이 기상과 지형조건에 따라 오염원에서의 확산형태와 특성은 큰 차이를 보이기 때문에 지금까지 많은 연구자들의 노력에도 불구하고 복잡한 현상을 정확히 예측할 수 없다. 대기확산시뮬레이션의 종류는 지형과 기상조건의 변화에 따라 대기 확산 형태의 차이가 다양하기 때문에 종류에 따른 장·단점을 정확하게 파악함으로써 대기확산시뮬레이션 수행결과와 정확도를 높일 수 있다. 또한 대기확산시뮬레이션의 입력 자료인 기상조건을 얼마나 실제 기상상황과 비슷하게 모사하는가에 따라 시뮬레이션 프로그램이 산출한 대기확산농도의 정확성이 결정

된다. 따라서 무엇보다도 정확도가 높은 기상자료, 지형자료, 오염물질 배출량을 필요로 한다. ALOHA 시뮬레이션은 기상 변화의 실시간 반영, 오염물질의 수직확산, 평균시간 농도 예측이 불가능 하지만 매우 빠른 시뮬레이션 결과를 도출함에 따라 사고발생시 신속한 대응이 가능하다. AERMOD 또한 실시간 기상반영과 오염물질의 수직확산의 예측은 불가능 하지만 ALOHA 보다 비교적 정확한 결과와 빠른 시뮬레이션 속도로 사고발생시 단기 대응에 유리하다. 환경부 화학물질안전원에서는 AERMOD기반의 CARIS (Chemical accident response information system)를 사용하는데, 해당모델은 가우시안 플룸 모델로 복잡한 주변지형을 고려하지 않고, 하나의 기상통계 자료를 이용하기 때문에 화학사고로 인한 피해영향범위의 정확성이 결여될 수 있다(Kim et al., 2013; Lim et al., 2015; Yoon, 2015; Kim et al., 2017; Lee et al., 2017). CALPUFF (California puff model)의 경우는 가우시안 퍼프 모델로 주변지형과 실제기상을 고려하여 시뮬레이션을 수행해 비교적 정확하다. 그러나 대기확산시뮬레이션을 수행하기 위한 필요데이터가 많고, 실시간 결과 도출이 어려워 신속한 사고 대처가 불가능하다는 한계가 있다(Scire et al., 2000). 대부분의 선행연구에서는 ALOHA, AERMOD, CALPUFF 등 단일 대기확산시뮬레이션을 이용한 연구 결과가 대부분이었다(Lee et al., 2012; Kim et al., 2013; Lim et al., 2015; Kim et al., 2017; Lee et al., 2017). 개별 대기확산시뮬레이션 결과를 활용하여 유해화학물질의 거동을 해석한 결과 각각의 대기확산시뮬레이션 장단점을 고려하지 못하였고, 이는 유해화학물질의 피해영향범위 예측 결과 해석에 있어 오류를 범할 수 있다(Kim et al., 1996). 화학사고 발생 시 기상상황에 따라 유해화학물질이 비교적 먼 곳까지 확산될 수 있으므로 화학사고 시나리오를 기반으로 한 계절·풍향·풍속별 피해영향범위 예측에 따른 화학사고 대응 연구 또한 필요하다(Kim et al., 2003; Kim et al., 2013).

2016년 부산·울산지역에서 발생한 가스냄새 및 악취 원인이 확인되지 않아 국민들의 불안감이 증대되었다. 이에 국민안전처(현 행정안전부)는 조속한 원인규명과 재발방지 대책마련이 필요하게 되었고 민·관 합동 조사단이 구성되어 원인분석 및 제도개선사항을 도출하였다. 본 연구에서는 원인조사에 따른 보도자료와 기존 선행연구를 바탕으로 ALOHA, AERMOD, CALPUFF 세가지 대기확산시뮬레이션 중첩분석을 통해 악취피해영향범위를 분석하였다. 악취 유발물질의 이동경로에 가장 큰 영향을 미치는 풍향·풍속 특성을 부산 및 울산지역에 위치한 기상관측지점의 자료를 이용하여 분석하고, 풍향에 따라 비교·분석함으로써 향후 부산·울산지역의 악취와 대기질 관리에 있어서 중요한 기초자료를 확보하고자 한다. 또한 본 연구는 이번 2016년 발생한 악취의 원인지역을 검증하고자 하는 것이 아닌, 개별의 대기확산시뮬레이션의 한계를 파악하고, 결과의 불확실

성 극복을 통한 대기확산시뮬레이션 중첩분석 방법론을 제시하고자 하였다.

2. 연구대상 및 연구방법

2.1 연구대상지역

1980년대 이후 국가 경제의 성장을 위한 다양한 산업단지 개발의 필요성을 충족시킬 목적으로 개발된 산업단지의 활발한 육성지원은 경제성장에는 효과적이었던 반면에 상대적으로 환경문제를 방치하게 되었다. 부산광역시와 울산광역시는 한반도 동남단에 위치하고 있으며, 우리나라 대표적인 공업도시로서 산업단지, 공업단지, 항만 등과 같이 주민에게 위해를 줄 수 있는 다양한 오염원을 포함하고 있다.

부산 산업단지지역은 부산 경제의 중요한 부분을 차지하고 있으며, 꾸준한 도시화 진행으로 주거지역과 공업지역이 혼재하게 되었고, 이로 인한 환경과 관련된 민원이 지속적으로 증가하고 있다(Fig. 1(a)). 울산의 남동쪽지역에는 공단이 위치하고 큰 도로를 사이에 두고 주거지역이 매우 인접하게 위치하고 있다(Fig. 1(b)). 이로 인해, 울산지역 산업단지에서 발생하는 대기오염물질 및 악취가 주거지역으로 영향을 미칠 수 있는 것으로 판단된다.

Fig. 1. Analysis of the Targeted Modeling Area and Geomorphological Characteristics in (a) Busan and (b) Ulsan, Red and Yellow Circle are indicated that Residential and Industrial Area

국민안전처(현 행정안전부)는 2016년 7월 부산·울산지역에서 발생한 가스냄새악취에 관련하여 ‘민·관합동조사단’의 조사결과를 발표하였다(MPSS, 2016). 본 보도자료에 따르면 부산·울산 가스냄새악취는 신고 표현 및 냄새충격 형태가 다르므로, 근본 원인과 물질이 상이하다고 판단하였고, 결과적으로 부산 냄새신고의 경우 연료가스에 주입되는 부취제 또는 부취제를 포함한 미량의 화학물질이 차량 이동 중 누출을 하였고, 울산의 경우 화학공단에서 발생하는 이산화황, 황화수소, 휘발성 유기화합물이 혼합된 악취가 기상조건에 따라 확산된 것으로 판단하였다. 따라서 부산의 경우 악취유발물질이 이동오염원인 차량에 의하여 확산되었고, 울산의 경우 화학공단에서 악취가 발생하여 비교적 먼 주거지역까지 영향을 준 것으로 발표하였다.

2.2 대기확산시뮬레이션 수행 사례일 및 오염원 선정

본 연구에서는 국민안전처(현 행정안전부) 보도자료의 민원자료 분석결과와 해당 신고기간의 실시간 기상자료를 이용하여 연구를 수행하였다. 2016년 7월 21일 부산광역시에 신고된 민원신고 시간을 참고하여 고정오염원일 경우와 이동오염원일 경우의 가능성을 열어두고 대기확산시뮬레이션을 이용하여 악취피해영향범위를 분석하였다. 부산은 2016년 7월 21일 17시 31분 경 해운대 주거단지에서 신고된 민원을 시작으로 이후 약 100분 동안 해운대 수영구, 남구, 동구, 중구를 거쳐 강서구 명지동까지 북서쪽방향으로 약 26 km를 이동하는 형태로 악취 민원이 접수 되었다. 2016년 7월 21일 17시의 당시 풍속은 약 2 m/s로 악취유발물질 오염원을 고정오염원으로 가정하였을 경우, 악취물질이 최대 7.2 km까지 부채꼴 모양으로 확산할 수 있음을 추정하였다. 그러나 실제 접수된 민원의 위치, 시간을 비교분석한 결과 고정오염원 보다는 이동오염원에 의한 악취발생의 가능성이 매우 높은 것으로 판단하고 대기확산시뮬레이션을 수행하였다. 울산광역시의 경우 악취민원이 주로 발생한 2016년 7월 22일과 23일의 민원신고지역이 다르므로 7월 22일과 23일 각각의 날짜에 대하여 대기확산시뮬레이션 결과를 접수된 민원신고 자료와 기상청의 실시간 기상자료를 이용하여 악취피해영향범위 예측 결과를 해석하였다. 2016년 7월 22일은 울산광역시 온양읍에 위치한 주거지역 일대에서 15시 - 18시 사이 악취민원이 접수 되었고, 2016년 7월 23일의 경우에는 울산 남구 신정동을 포함하는 인근 주거지역에서 악취민원이 접수되었다. 또한 신고자의 신고 내용이 부산과 달리 여러 가지 냄새 형태로 접수되었다. 특히 2016년 7월 23일 울산 기상조건은 저기압, 높은 기온(29도), 높은 습도(67~73%)로 악취확산에 적합한 기상상황이다. 주풍향은 남동풍으로 공단에서 악취가 발생하였을 경우 악취유발물질이 주거지역으로 확산될 가능성이 높은 것으로 추정하였다. 따라서 울산의 경우 화학 또는 산업공단에서

발생한 악취유발물질이 당시의 기상조건에 의해 인근 주거 지역으로 확산된 것으로 추정하였다.

따라서 본 연구에서는 국민안전처(현 행정안전부)의 2016년 부산울산지역 가스냄새악취 보도자료를 기초로 부산의 경우 악취유발물질의 확산이 고정오염원과 이동오염원일 경우를 가정하여 대기확산시물레이션을 수행하였고, 울산의 경우 고정오염원으로 가정하여 대기오염물질 또는 악취유발물질의 발생과 기상학적 요소를 함께 활용하여 대기확산시물레이션 중첩분석을 수행하였다.

2.3 실시간자동기상관측(AWS) 자료분석

부산 및 울산지역에서 풍향 및 풍속을 측정하고 있는 자동기상관측(Automatic Weather Station, AWS) 자료 중 민원신고 대상지역 부근의 기상관측소인 부산관측소(부산, 대연, 사하, 해운대), 울산관측소(울산, 울산공항)의 자료를 이용하였다. 또한 바람의 특성을 표현하고 분석하기 위해 바람장미를 이용하였다. 풍향 및 풍속자료를 16 방위 및 풍속에 따른 빈도수 결과를 표현하고 활용하였다. 각 지역의 2016년 7월의 풍향·풍속 특성을 분석하였다.

2.4 중첩분석을 위해 사용된 대기확산시물레이션 (ALOHA, AERMOD, CALPUFF) 지형 및 기상 입력자료

시물레이션 수행에 있어서 지형 해상도 차이는 3차원 기상장 및 악취물질 확산 결과에 민감하게 반응할 수 있기 때문에 정확도가 높은 지형자료를 입력 자료로 이용하는 것이 중요하다. ALOHA 시물레이션은 지형자료가 고려되지 않지만, AERMOD와 CALPUFF는 실제 지형자료를 입력 자료로 활용할 수 있다. 토지이용도, 지표 거칠기, 알베도, 고도 등을 포함하는 지형자료로 이용할 수 있는 자료로 USGS Digital Elevation Model(DEM) data, ARM3 digital terrain data, Canadian (Alberta) DEM terrain data, SRTM3 등이 있다. 여기서 DEM이란 지면의 높낮이를 기록한 자료로서 일반적으로 DEM은 식생과 인공지물을 포함하지 않는 지형만의 표고값을 의미하며, 대부분 일정한 격자 형태로 높이를 기록하는데 이 간격이 좁을수록 지형이 현실과 가깝게 표현된다. 본 연구에서는 NASA에서 TIFF형식으로 제공하는 ASTGTM2 파일로서 1 arc-sec(~30 m)의 해상도를 가지고 있는 지형자료를 이용하였다.

연구 대상 영역의 기상 현황을 시물레이션에 반영하기 위해 대상지역 및 대상지역 인근에 위치한 기상관측소 기상관측자료(기상청)와 미국 해양 대기 관리처(NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 배포되는 기상자료를 이용하였다(Korea Meteorological Administration, 2016). AERMOD와 CALPUFF 시물레이션 수행을 위해 부산 및 울산에 위치하는 기상관측 지점인 중관기상관측, 방재기상관측 및 항공기상관측소 중 본 연구영역에 위치한

기상관측소의 자료를 이용하였다. 부산의 중관기상관측 1개 지점(부산), 방재기상관측 8개 지점(사상, 사하, 부산진, 부산(레), 남항, 영도, 대연, 북항, 해운대), 울산의 중관기상관측 1개 지점(울산), 방재기상관측 3개 지점(온산, 간절곶, 울기), 항공기상관측 1개 지점(울산공항)의 기상자료를 분석·활용하였다. 또한, 본 연구에서 사용된 고층기상 자료는 기상청에서 관측되고 NOAA에서 제공하는 라디오존데(radiosonde) 관측자료(포항)를 활용하였다. ALOHA 시물레이션은 한가지 풍향과 풍속만 고려되므로 부산지역은 민원신고 당시 주 풍향이었던 북동풍 계열의 바람이 약 2 m/s의 속도로 가정하였고, 울산지역은 공단에서 불어오는 남동풍 계열의 바람을 타고 악취물질이 인근 주거지역으로 확산된 것으로 추정하여 시물레이션을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 기상분석결과

2016년 7월 1일 - 7월 31일까지 한달 동안의 기상관측자료 중에서 풍향 및 풍속 자료만 추출하여 분석한 결과를 연구영역과 관련된 지도에 나타내었다. 바람장미의 화살대 방향은 불어오는 바람의 풍향을, 화살대는 풍속의 계급별 빈도를 의미한다. 풍속은 0.5-2.0 m/s는 주황색, 3.0-4.0 m/s는 노란색, 4.0-5.0 m/s는 초록색, 5.0-6.0 m/s는 파란색, 6.0-7.0 m/s는 남색, 7.0m/s 이상은 보라색을 나타내며, 색상과 길이의 차이는 풍속의 빈도를 의미한다. 2016년 7월 한 달을 대상으로 기상을 분석한 결과, 부산과 울산 모두 주로 남서풍과 북동풍 계열의 바람이 많이 불었다. 특히 해안에 위치한 기상관측소의 경우 주간과 야간에 따른 해풍과 육풍에 의해 낮에는 서풍 계열의 바람이 밤에는 동풍계열의 바람이 불었다. 부산에 위치한 사상 기상관측소의 경우 왼쪽으로 낙동강이 위치하고, 오른쪽으로 백양산과 구덕산이 위치하여 산악지형 바람이 불어가는 바람길이 형성되므로써 남서풍과 동북동 계열의 바람이 부는 것을 확인하였다(Fig. 2(a)).

또한 본 연구의 연구대상기간인 7월 21일 - 23일을 대상으로 각 지역의 풍향을 비교분석 한 결과, 분석기간 중 특히 악취민원이 접수되었던 시간대에는 주로 남서풍과 동북동 계열의 바람이 많이 발생하므로써, 악취유발물질이 주거지역으로 불어갈 가능성이 높았다. 특히 이 결과는 울산지역의 경우 악취가 발생하였을 때, 이 악취물질이 인근 주거지역으로 확산될 가능성이 높은 것으로 분석되었다(Fig. 2(b)).

3.2 부산광역시 대상 개별 대기확산시물레이션 수행결과 분석

2016년 7월 21일 17시 - 19시 사이 부산의 ALOHA, AERMOD, CALPUFF 대기확산시물레이션 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 각각의 대기확산시물레이션 분석을 위하여 악취발생 오염원은 고정오염원인 경우와 이동오염원인 경우

Fig. 2. Windrose using Data from Automatic Weather Station during Period of Simulation (a) Busan and (b) Ulsan

Fig. 3. Result of the Air Dispersion Simulations, which are ALOHA, AERMOD, and CALPUFF by Stationary and Mobile Sources in Busan

를 가정하여 분석을 수행하였다. 먼저 ALOHA를 이용하여 수행한 시뮬레이션 결과를 Figs. 3(a), (b)에 나타내었다. 악취유발물질이 고정오염원으로부터 확산된 경우를 가정할 경우 악취가 17시 31분경에 발생하였다 하여도, 인근 주거지역에서 감지될 정도의 농도로 확산되고, 최종 신고지인 강서구 명지동 주거지역 부근까지 확산되기 어려운 것으로 판단되었다. 반면에, 이동오염원을 가정한 경우에는 차량으로 추정되는 이동경로를 따라 악취물질이 이동·확산하므로

써 수영구 해운대 주거지역에서 시작하여 강서구 명지동 인근지역에까지도 악취에 의한 민원신고 가능성을 확인할 수 있었다. AERMOD를 이용한 시뮬레이션 수행결과를 Figs. 3(c), (d)에 나타내었다. AERMOD를 이용하여 대기확산시뮬레이션을 실시한 경우에도 ALOHA를 이용하였을 때와 마찬가지로 악취물질이 이동오염원에 의해 확산되었을 경우 이번 악취민원신고와 비슷한 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 주변 지형과 실제기상자료를 활용하여

시뮬레이션을 수행하는 대기확산시뮬레이션인 CALPUFF를 이용한 결과를 Figs. 3(e), (f)에 나타내었다. Figs. 3(e), (f)에서 볼 수 있듯이 부산의 공간적 기상장 분포도를 분석하고, CALMET 모델로 생성한 3차원 실제 기상장 자료를 이용하여 시뮬레이션 결과와 악취민원 신고 내역을 비교한 결과, 이동오염원(Fig. 3(f))에 의하여 악취물질의 확산 가능성이 고정오염원(Fig. 3(e))일 경우보다 훨씬 높음을 알 수 있었다. Fig. 3에서 나타낸 것과 같이 2016년 7월 21일 17시 31분 경 처음 악취민원신고를 시작으로 시간에 따라 이동하는 이동오염원에 의해 19시 경 강서구 명지동까지 악취물질이 당시의 바람방향(북동풍과 동북동풍)에 따라 이동오염원에 의하여 확산될 수 있음을 확인하였다.

3.3 울산광역시 대상 개별 대기확산시뮬레이션 수행결과 분석

Fig. 4는 울산지역 2016년 7월 22일 13시-16시와, 2016년 7월 23일 15시-18시 사이 접수된 민원신고 시간을 바탕으로 개별의 대기확산시뮬레이션 ALOHA, AERMOD, CALPUFF를 수행한 결과이다. 악취가 발생한 오염원은 인근 공단지역으로 추정하여 대기확산시뮬레이션을 수행하였다. ALOHA (Figs. 4(a), (b))와 AERMOD (Figs. 4(c), (d))의 경우 2016년 7월 22일 13시-16시의 시간대에는 기상청의 자료를 참고하여 동북동풍을, 2016년 7월 23일 15시-18시의 경우 동남동풍을 풍향 입력자료로 활용하였다. CALPUFF(Figs. 4(e), (f))의

경우 울산과 울산공항의 실제기상자료를 기상입력 자료로 활용하여 시간에 따라 변화하는 기상장을 생성하여 대기확산시뮬레이션을 수행하였다.

Figs. 4(a), (c), (e)에서 나타낸 것과 같이 7월 22일의 경우, 울산광역시의 온양지역 대해서 공간적 기상장 분포를 생성하여 각각의 대기확산시뮬레이션을 실시한 결과 악취민원이 신고된 시간대인 13-16시 사이에 동북동풍 계열의 바람이 강하게 불어나가는 것을 확인할 수 있었다. 대기확산시뮬레이션을 수행한 결과 온양읍 일대의 주거지역과 온양공단의 남쪽에 위치한 공단지역까지 악취물질이 확산될 것으로 모사되었으나, 남쪽의 공단지역에서는 민원이 들어오지 않았다. 이는 2016년 7월 22일이 금요일이었고, 오후 시간으로 공단직원이 특별히 악취 관련한 민원신고를 하지 않았던 것으로 추측된다.

Figs. 4(b), (d), (f)는 2016년 7월 23일(토요일) 울산광역시의 주요 주거 지역인 남구 일대에서 다발로 발생한 악취민원 신고사례를 가정하여 대기확산시뮬레이션을 수행한 결과이다. 2016년 7월 23일을 대상으로 한 시뮬레이션의 경우 울산 여천동지역에 위치한 업체에서 악취가 발생한 경우에 대해서 공간적 기상장을 생성하여 시뮬레이션을 수행하였다. 7월 23일 민원이 주로 접수되었던 시간대에는 동남동풍의 풍향이 분 것을 알 수 있었고, 이때 여천동 인근의 공단지역에서 악취물질이 발생하였을 경우 울산광역시 남구일대의 주거지역으로 악취물질이 확산될 가능성이 있는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 4. Result of the Air Dispersion Simulation, which are ALOHA, AERMOD, CALPUFF, by July 22 and 23 in Ulsan

3.4 대기확산시뮬레이션 중첩결과 분석

본 연구의 목적은 앞서 언급하였듯이, 각각의 대기확산시뮬레이션의 장·단점에 따른 한계로 결과해석의 오류가 발생할 수 있으므로, 각각의 단일 대기확산시뮬레이션(ALOHA, AERMOD, CALPUFF)을 이용하여 악취물질의 확산을 1차적으로 해석하고, 최종적으로 중첩분석을 통해 악취피해영향범위를 확인하고자 하였다. 따라서 Fig. 5에 부산과 울산지역의 각각 2016년 7월 21일, 22일, 23일의 악취물질의 확산을 중첩하여 표현하였다. 그 결과, 부산·울산지역 악취민원 신고지역에 악취유발물질이 풍속과 풍향에 따라 도달할 수 있음을 확인하였다. Fig. 5(a)에서 확인 할 수 있듯이, 부산의 경우 신고자로 및 중첩분석 결과, 오염원이 고정오염원이 아닌 이동오염원에 의해 해안도로 주변으로 악취물질이 확산되어 나갔음을 확인할 수 있었다. ALOHA와 AERMOD의 경우 비록 시뮬레이션 속도는 빠르지만, 주변지형과 실시간 기상 이 고려되지 못하므로 악취피해영향 우려지역이 과대하게 도출되는 경향이 발생하는 것을 확인하였다. 따라서 실시간 기상이 고려된 CALPUFF의 대기확산시뮬레이션 결과를 포함하여 중첩분석 하므로써, 우선적으로 악취 피해가 있을 것으로 예상되는 지역을 확인할 수 있었다. 부산의 동북동쪽에 위치한 해운대부근에서 시작된 악취유발물질이 자동차와 같은 이동오염원에 의해 확산·이동함에 따라 이동경로 인근에 위치한 주거지역에 악취로 인한 피해가능성을 확인하였다. 또한 Figs. 5(b), (c)에서 확인 할 수 있듯이, 울산의 경우도 중첩분석을 통해 공단지역에서 고농도로 악취유발물질이 배출 될 경우 당시 울산의 기상상황에 의해 충분히 인근 주거지역까지 악취가 도달 할 수 있음을 확인하였다. 따라서 악취피해를 저감하기 위해서는 지속적인 모니터링을 통해 특별한 오염원이 존재하는지 파악하고 관리가 필요할 것으로 예측하였다.

악취민원신고를 받고 현장에 출동하였을 경우 이미 악취가 사라지는 경우가 많기 때문에 악취가 발생한 위치를 추적하는 것이 한계가 있다. 이 연구에서 확인하고자 하는 것은 이번 악취민원의 발생지역을 검증하고자 하는 것이 아닌, 다양한 대기확산시뮬레이션의 장단점을 극복하기 위하여 중첩분석을 실시하고, 그 결과를 바탕으로 악취확산특

성에 따른 공통 피해영향범위를 알아보는 것이다. 향후 선 연구자들의 연구결과를 참고하여 대기확산시뮬레이션의 정확도를 높이기 위한 연구가 진행되어야 하고, 악취배출에 의한 주거지역의 피해를 보다 정확히 연구하기 위해 오염물질 배출원의 위치, 농도, 배출량 등을 세부적으로 다시 산정할 필요가 있다. 또한 현장실험을 통해 대기확산시뮬레이션 예측결과와 타당성을 확인할 필요가 있다.

4. 결 론

본 연구의 시범사례로서 2016년 7월 21일 부산과 2016년 7월 22일 및 23일 울산에서 발생한 악취 민원을 대상으로 대기확산시뮬레이션 중첩분석을 수행하였다. 개별 대기확산시뮬레이션의 한계를 극복하고자 각각의 대기확산시뮬레이션 결과를 KML 또는 KMZ 형식으로 도출하고, 그 결과를 중첩분석하여 악취피해영향범위를 확인하였다. 그 결과 각 모델의 중첩지역을 확인하였고 이 결과를 바탕으로 민원신고 가능성이 있는 악취유발물질 영향지역을 확인할 수 있었다. 악취란 사람의 후각을 자극하여 불쾌감과 혐오감을 주는 냄새를 말한다. 삶의 질의 향상에 따른 쾌적한 대기질에서 생활하고자 하는 시민의 욕구에 따라 악취관련 민원 또한 계속하여 증가하는 추세이다. 이러한 악취는 발생하면 기상 상황에 따라 비교적 먼 곳까지 확산되고 주변 환경 및 주민건강에 영향을 미칠 수 있다. 그러므로 악취가 발생 하였을 경우의 기상상황에 따른 피해영향범위 예측이 매우 중요하다. 부산 및 울산은 인근 공단 혹은 악취유발물질배출 지역과 주거지역이 인접하므로, 주민들의 건강관리와 안전을 위해 현실적인 악취확산 예측과 관리가 필요하다. 또한, 악취로 인한 대기오염개선을 위해서는 공단지역과 도심에서의 악취오염원 관리를 위한 적절한 대책이 마련되어야한다. 이러한 연구결과는 향후 악취유발물질로 인한 민원 발생 시 피해범위 예측과 대응방안 수집을 위한 기초자료 및 방법론으로 활용될 수 있다.

더 나아가 악취뿐만이 아닌 화학사고와 같은 재난 발생 시 각각의 대기확산시뮬레이션의 장단점을 극복하여 유해 화학물질의 대기 중 확산으로 인한 피해영향범위를 예측하

Fig. 5. Result of the Overlapping Analysis of Air Dispersion Simulations, which are ALOHA, AERMOD, and CALPUFF. (a) 21 July at Busan, (b) 22 July at Ulsan, and (c) 23 July at Ulsan

고 이에 따른 대응방안을 수립하는데 기초자료로서 사용될 수 있다. 향후, 화학사고와 같은 사고성 재난 발생 시 신속한 주민소산을 위한 다양한 시나리오를 생성하고, 이를 바탕으로 중첩분석 연구를 수행할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 행정안전부 재난원인 조사기술 연구사업의 연구비지원(재난원인 현장감식 기술개발, NDMI-주요-2017-05-01)에 의해 수행되었습니다.

References

- Crowl, D.A., and Louvar, J.F. (2001) *Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications*. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, N.J.
- Kil, I.S. (2009) *Research on Tracking System of Odor Emission by Real-time Odor Monitoring System*. Ph.D. dissertation, Korea Polytechnic University, Korea.
- Kim, C.H., Park, C.J., Park, J.H., Im, C.S., Kim, M.S., Park, C.H., Chun, K.S., and Na, J.G. (2003) Chemical Accidents Response Information System (CARIS) for the Response of Atmospheric Dispersion Accidents in Association with Hazardous Chemicals. *Journal of Environmental Impact Assessment*, Vol. 12, No. 1, pp. 23-34.
- Kim, D.Y., and Cho, J.M. (2009) 'Malodor Stop Project' *Achievements and Improvements*. Gyeonggi Research Institute, 2009-45.
- Kim, J.H., Jeong, C., Kang, S.M., Yong, J.W., Yoo, B., and Seo, J.M. (2017) Comparison Study for Impact Range of Prediction Models Through Case Study about Gumi Hydrogen Fluoride Accident. *Korean Chemical Engineering Research*, Vol. 55, No. 1, pp. 48-53.
- Kim, J.H., Kim, C., Seok, J., Kang, S.M., Yong, J.W., Yoo, Y., and Seo, J.M. (2017) Comparison Study for Impact Range of Prediction Models Through Case Study about Gumi Hydrogen Fluoride Accident. *Korean Chemical Engineering Research*, Vol. 55, No. 1, pp. 48-53.
- Kim, K.H., Oh, Y.S., Chang, T.S., and Yoon, E.S. (1996) A Consequence Estimation of Release of Hazardous Materials to Surrounding Area. *Theories and Application of Chemical Engineering*, The Korean Institute of Chemical Engineers, Vol. 2, No. 2, pp. 3067-3070.
- Kim, S.G., Chung, S.B., Lim, K.K., and Park, M.J. (2013) Developing Incident Response Manuals Standardized for Transporting Hazardous Materials. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 13, No. 1, pp. 235-241.
- Korea Meteorological Administration (2016) Retrieved from <https://data.kma.go.kr>.
- Lee, D.J., Ahn, J.H., and Song, C.G. (2017) Improvement of Damage Range Calculation for First Response to Chemical Accidents. *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 32, No. 2, pp. 59-65.
- Lee, H.J., Kim, M.Y., Park, B.S., Han, J.H., Kim, J.Y., and Park, S.-H. (2015) Risk Assessment according to Chemical Accident Occurrence Using Air Quality Model (CALPUFF). *Proceedings of the 58th Meeting of Korean Society for Atmospheric Environment*, Korea, p. 187.
- Lee, H.M., Lee, H.W., and Lee, S.H. (2012) Analysis of Seasonal Air Parcel Movement Pattern in South-Eastern Part of the Korean Peninsula Using WRF/FLEXPART. *Journal of the Environmental Sciences*, Vol. 21, No. 3, pp. 327-337.
- Lee, S.W. (2012) Prediction of Malodorous Landfill Substances Effect on Ambient Air Quality-A Case Study on Cheongju • Cheongwon Metropolitan Landfill. *Journal of Environmental Impact Assessment*, Vol. 21, No. 5, pp. 695-705.
- Lim, C.-H., and Doh, S.-H. (2015) A Study on Adequacy Assessment of Protective Action Distance in Hazardous Chemical Accident by AERMOD Modeling. *Fire Science and Engineering*, Vol. 29, No. 1, pp. 7-11.
- Ministry of Public Safety and Security (MPSS) (2016) Press release, Aug. 4.
- Oh, J.-S., Sohn, C.-Y., Hyun, J.-I., and Sung, J.-K. (2011) Developing the Real-Time Atmospheric Dispersion System of Hazardous Chemicals for Proactive Response. *Proceedings of Korea Information Science Society Conference*, Vol. 38, No. 1C, pp. 13-16.
- Park, C.J. (2011) The Study on the Correlations of Civil Appeals of Odor and the Odor Management Areas. *Journal of Korean Society of Odor Research and Engineering*, Vol. 10, No. 4, pp. 198-203.
- Scire, J.S., Robe, F.R., Fernau, M.E., and Yamartino, R.J. (2000) *A User's Guide for the CALMET Meteorological Model*. Earth Tech, Inc. Concord, MA, USA.
- Song, C., and Yang, B. (2017) A Study on the Building of Disaster Prevention Platform for Effective

Response System to Hazardous Chemical Accidents: Centering on Yeosu Industrial Complex. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 17, No. 2, pp. 93-99.

Song, D.W., Song, C.K., and Kim, C.H. (2003) A Study on the Atmospheric Dispersion of Odor Emitted from Banwol/Sihwa Industrial Complex in Ansan Area. *Journal of Environmental Impact Assessment*, Vol. 12, No. 5, pp. 323-340.

Yoon, B.Y. (2015) *Evaluation of Accidental Hazardous*

Chemical Dispersions in Industrial Area by ALOHA and CALPUFF Models. Ph.D. dissertation, Kyungpook National University, Korea.

Received	■	November 1, 2017
Revised	■	November 6, 2017
Accepted	■	November 15, 2017