

산업단지 주변의 PM-10 확산특성을 고려한 주거계획기준 연구*

A Study on the Criterion for Residential Area Adjacent to an Industrial Complex by Considering the Dispersion Characteristics of PM-10

유희선** · 이창수***

Ryu, Hee-Seon · Lee, Chang-Soo

Abstract

This study intends to suggest urban planning direction to minimize the influence originated from air pollution materials through analysis of dispersion characteristics of the exhaust gases of an industrial complex adjacent centered on city case.

For this purpose, the improvement level of the air quality of nearby cities has been evaluated using ISCST-3 of Air Dispersion Model centered on fine dust (PM-10).

The analysis results reveal that by planning 5~10 stories (15~30m) in case of within the separation distance of 1.7km and more than 10 stories (30m) according to height of the buildings in the area, pleasant residential environment of the downtown can be constructed. In addition, as dispersion degree of polluted materials is differentiated greatly according to the topographic characteristics, it was conclusively judged that position of an industrial complex should be selected where polluted materials can be dispersed fastest centered on the industrial complex that emits pollutants.

키 워 드 ■ 주거기준, 미세먼지, PM-10, 대기오염 확산, 이격거리, ISCST3 모델링
Keywords ■ Housing Standard, Particulates, PM-10, Dispersion Characteristics of Air Pollutants, Separation Distance, ISCST3 Modelling

I. 서 론

도시의 고밀도 개발에 따른 인구 집중과 산업의 고도화 및 생활패턴의 변화로 인해 화석연료를 사용하는 각종 교통수단의 발달과 에너지 수요 증가 등에 따라 도시지역 내 대기오염이 날로 심각해져 가고 있으며, 지속적인 도시개발에 대한 압력으로 인해 도시 대기질은 더욱 악화될 것으로 예상된다.

도시 대기질의 악화는 황사의 유입뿐만 아니라

생활수준 향상에 따른 냉난방 증가, 자가용 이용률 증가, 도심지 정체, 산업단지 개발에 따른 대기오염 물질 배출 등 여러 가지 요인에 의해 단계별로 발현된다. 이러한 도시 및 산업단지 개발에 수반되는 대규모의 지표면 열수지 변화와 에너지 사용에 따른 인공열 발생이 도시내부의 기온을 상승시켜 도시열섬현상¹⁾을 초래하게 된다.

이와 같은 대기질 악화와 도시열섬현상은 시민의 건강에 직접적으로 피해를 주게 되므로 도시 및 산업단지 개발 사업에 따른 대기질과 환경영향 등을

* 이 논문은 2015년도 유희선의 박사학위 논문을 수정·보완한 것입니다.

** Jinduck Environmental Technology Service (Main author: nazis61@hanmail.net)

*** Gachon University (Corresponding author: changlee@gachon.ac.kr)

객관적이고 정량적으로 평가할 필요가 있다.

도시 및 산업단지 개발은 여러 계획단계를 거쳐서 이루어지므로 계획단계 초기부터 개발 사업에 따른 대기질과 환경영향 등을 예측하고 평가하여 환경과 도시민 건강에 쾌적한 도시 및 산업단지를 개발할 수 있도록 진행하는 것이 바람직하다. 현재까지 도시개발에 따른 도시 대기질에 관한 선행연구로서 장래 배출량 증감을 예측하여 산출하는 모델과 장래 대기오염농도 예측을 위한 확산모델 등 영향평가 기법이 많이 개발되어 있는 반면, 도시 인근의 산업단지 개발에 따른 도시 대기질에 관한 연구는 비교적 미흡한 편이다.

따라서 본 연구에서는 산업단지에 인접한 도시 사례를 중심으로 산업단지에서 배출되는 미세먼지의 확산특성을 고찰하고, 이를 통해 향후 산업단지 배후지 개발에 있어 대기오염물질에 의한 영향을 최소화하기 위한 도시계획 방향을 제시하고자 하였다. 산업단지에서 배출되는 오염물질이 기상조건에 의해 확산되는 특성을 고찰하기 위해 시화산업단지 및 정왕동 일대를 지역적 범위로 설정하였고, 대표 오염물질을 미세먼지(PM-10)로 국한하여 확산특성을 분석하였다. 또한, ISCST3를 이용한 모델링을 수행함에 있어 시흥시 정왕동 일원의 최근 자료 확보가 가능한 2011년 인천기상대의 기상자료와 2012년 CAPSS 배출량 자료를 활용하였다.

II. 선행연구 검토

1. 대기질

도시구조나 개발과 관련된 대기질 분야의 연구는 소수 연구자에 의해 기 수행되었다. 주요 연구 내용으로는 대기오염에 의한 사회적 피해액, 바람길의 영향, 도시 내 열섬효과 및 대기오염물질의 거동

특성 등으로 이를 요약하면 다음과 같다.

유영성 외(2004)는 지역별 대기오염도 측정자료와 인구분포 자료를 이용하여 각종 대기오염으로 인해 발생하는 피해건수를 추정하고, 이를 반영한 사회적 편익 등을 고려하여 비용으로 환산하였다. 그 결과 경기도의 미세먼지에 의한 피해건수는 약 61만 건에 이르고, 이를 비용으로 환산한 결과 1조 2,000억 원에서 4조 5,000억 원에 이를 것으로 추산하였다.

주현수 외(2006)는 CFD 수치해석을 통해 대규모 택지개발의 경우와 기 개발된 도심지역에서 건설되는 고층건물을 대상으로 바람길의 대기환경 영향을 예측하고자 하였다. 그 결과 대규모 택지개발의 경우에는 광역바람장이 매우 약화된 상태(무풍조건) 일 때 국지순환풍이 중요한 역할을 한다는 것을 규명하였다. 고층건물에서는 순간적으로 발생하는 돌풍과 같은 강풍의 생성으로 인해 대기질보다 강풍이 보행환경이나 주거환경에 더 큰 영향을 미칠 수 있다고 주장하였다.

김재철 외(2010)는 기상모델 등을 이용하여 도시 내 열섬현상을 예측한 결과 지표면의 변화로 인한 주변지역의 기상환경이 바뀔 수 있다는 것을 입증하였으며, 대기질 영향 이외에 기후변화에 의한 건강영향평가 제도를 도입할 것을 주장하였다.

한편 박일건 외(2012)는 남산1호 터널을 대상으로 터널 통과 구간 내 이산화탄소 농도 변화 특성을 도출하고, 모델링을 통해 터널 내 대기질 거동에 대한 현상을 고찰하였다. 그 결과, 창문 개방 시와 교통량이 집중되는 시간대, 그리고 터널 출구측에서 이산화탄소 농도가 증가하는 경향이 있으며, 터널 내 대기질 거동 특성이 차량이동 속도에 따른 공기유속과 밀접한 상관관계가 있다는 점을 입증하였다.

2. 도시형태와 대기질

도시공간구조나 사회경제적인 요인이 대기오염에 미치는 영향에 관한 연구들은 비교적 다양하게 이루어졌다. 국외 연구로는 주로 교통환경, 도시의 확산 정도 등을 변수로 대기오염물질 또는 오존의 농도와의 관계를 연구하였다.

Michael et al.(2003)은 로테르담, 뮌헨, 스톡홀름 지역을 대상으로 초미세먼지인 PM-2.5의 변동요인과 그 변동에 미치는 영향요인을 분석하였다. 분석 변수로는 도로와의 거리, 도로 혼잡 정도, 과적차량 수 등을 활용하였다. 분석결과 세 지역 모두 혼잡한 도로가 많을수록 초미세먼지가 높게 나타났다. 초미세먼지의 농도는 뮌헨의 경우 주요 도로가 가까울수록 높았으며, 스톡홀름은 인구밀도가 높을수록 높아지는 경향을 나타내어, 지역별로 초미세먼지의 농도에 영향을 미치는 주요 변수가 차이가 있었다.

Mats et al.(2008)은 교통과 대기오염과의 관계를 파악하기 위하여, 도로의 유형, 도로와의 거리, 인구밀도 등을 변수로 미세먼지, NOx, 일산화탄소 및 벤젠 등의 대기오염물질에 미치는 영향 요인을 분석하였다. 분석결과 사용된 토지이용 데이터 변수가 교통관련 대기오염수준에 통계적으로 유의한 영향을 미치고 있다는 보고하였다.

Jerrett et al.(2007)은 토론토 지역을 대상으로 공업 토지이용, 도로종류, 도로밀도, 주거밀도 등의 변수를 활용하여 NO₂에 미치는 교통요인을 회귀분석모형을 이용하여 분석하였다. 그 결과 다양한 교통요인 중 도로의 밀도가 NO₂의 농도에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 대상지역이 인구밀도가 낮고 단일용도의 토지이용으로 자동차 통행의 수요를 증가시켰기 때문이라고 제시하였다. 즉, 도시지역에서 NO₂의 농도를 줄이기 위해서는

토지이용을 단일용도에서 혼합 토지이용(mixed land use)으로 전환하여 자동차의 이용을 줄여야 한다고 주장하였다.

한편 Brian Stone Jr.(2008)은 미국 대도시를 대상으로 도시확산현상과 오존의 생성과의 관계를 회귀분석하였다. 분석과정에서 CBD(Central Business District)의 일정 반경 내의 인구밀도, 도로밀도, 교차로수, 가구밀도, 토지이용 등을 변수로 사용하였다. 회귀분석 결과 오존의 농도는 계절적 영향을 많이 받으며 주로 여름철에 높았으며, 단일용도의 토지이용일수록 오존의 농도가 높게 나타나고 도시 확산지수가 낮을수록 오존의 농도가 낮아지는 것으로 분석되었다.

3. 녹지와 도시의 온도

도시의 녹지가 도시의 온도에 영향을 미치는 연구는 국내에서 많이 수행되어 왔으며, 주로 도시의 열섬효과를 분석하기 위한 연구가 대부분이다.

윤용한(2000)은 일정한 규모 이상의 공원으로부터 온도가 완화되는 거리는 대기온도에 따라 250~300m라고 보고하였다.

김학열(2003)은 녹지면적의 증가에 따른 도시의 온도 및 대기의 온도 등에 대하여 다중회귀분석을 실시하여 녹지와 온도와의 관계식을 추정하였다.

또한 박종훈(2013)은 도시블록단위에서 소규모 녹지가 기온저감에 기여하는지 평가하는 연구를 수행하여 비녹지인 양지의 기온보다 녹지의 기온이 최고 4.2℃ 정도로 유의성 있게 낮았다는 결과를 제시하고 블록단위에서 소규모 녹지가 기온저감 효과를 갖는 것으로 결론을 지었으며, 블록의 기온을 2℃ 가량 낮추는 데에 녹지율이 20% 정도 확보되어야 한다고 제시하였다.

한편, 윤희천 외(2013)는 구미시를 대상으로

Landsat 위성영상을 분석하여 녹지증가에 따른 온도변화 분석하였으며, 그 결과 동일지역에서 기존 녹지면적 대비 녹지면적이 75% 정도 증가하였을 경우 도시의 온도가 0.4~0.8℃ 감소하는 것으로 보고하였다.

도시의 녹지가 도시의 온도에 영향을 미치는 연구는 주로 도시의 열섬효과를 분석하기 위해 수행되었다. 또한, 대다수 연구결과는 녹지율 증가에 따라 도시 내 온도저감 효과가 크기 때문에 도시계획 시 일정비율 이상의 녹지를 확보해야 한다고 주장하고 있다.

그간의 선행연구들은 도시특성과 대기오염 수준의 관계를 주로 분석하였다. 국내외의 주요 선행 연구들은 인구밀도, 도로, 교통 등을 주요 변수로 설정하고 대기오염에 미치는 영향요인을 주로 분석함으로써 도시계획 시 고려해야 할 인자를 다양하게 제시하였다. 반면, 대기오염 물질의 확산특성과 도시형태와의 관계성을 규명한 연구는 국내외에 극히 드문 것으로 확인되었다.

III. 연구방법

1. 연구의 전제

본 연구는 도시계획 수립 시 산업단지에서 배출되는 대기오염물질의 확산특성을 고려한 오염도 특성분석을 통하여 향후 산업단지 주변 주거계획 기준을 마련하고자 한 것으로, 분석을 위하여 다음과 같은 전제조건을 설정하였다.

1) 분석 대상지

시화산업단지 인접 배후도시 주민들은 대부분 산업단지 조성 후 상당기간 동안 교육환경, 생활편의시설, 환경문제 등 측면에서 주거만족도가 낮은 것

으로 파악되었다. 특히 환경문제 부분에서는 심각한 악취와 대기오염에 시달려 왔던 것으로 정성호·고석찬(2011)은 보고하였다. 즉 산업단지 배후도시의 주거환경의 쾌적성을 확보하기 위해서는 악취 및 대기오염을 적절하게 통제하는 것이 무엇보다도 중요하다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 산업단지에서 배출되는 대기오염물질의 영향이 주변 배후주거지역 대기질에 미치는 영향을 분석하기 위하여 시화산업단지가 위치한 경기도 시흥시 정왕동을 연구 대상지역으로 선정하였다.

대기오염물질을 배출하는 오염원은 시화산업단지의 규모와 오염배출 사업소의 밀도를 고려하여 내 사업소별 굴뚝이 밀집한 구역을 중심으로 지름 1.6km 구역으로 설정하였다. 한편, 오염원으로부터 배출되는 대기오염물질이 대기 중에서 농도로 발현되어 그 영향을 받는 지점을 수용지로 정의하는 바 본 연구에서는 수용지점을 오염원으로부터 반경 3.5km로 설정하였고, 오염원 지역으로부터 거리에 따른 확산특성 분석을 수행하였다. <그림 1>과 <그림 2>에 대상지역 오염원과 수용지점 및 오염원 주변 배후 주거지역 현황을 나타낸 것이다.

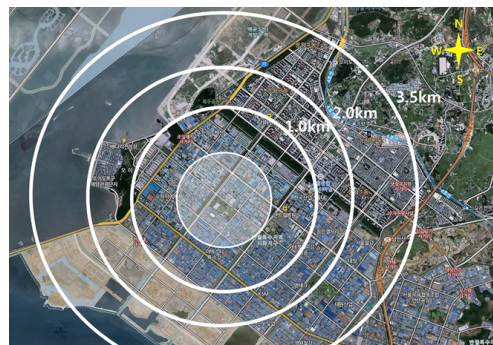


Figure 1. Area of case study



Figure 2. Sihwa industrial complex and adjacent dwelling areas

2) 분석 대상물질

분석대상 물질로는 「환경정책기본법」에서 정하고 있는 대기오염물질 중 지속적인 관리가 필요한 미세먼지(PM-10)를 선정하고, PM-10의 대기확산특성을 분석하였다.

본 연구에서 적용한 모델은 대기오염물질의 확산 현상만을 고려할 뿐 화학반응 및 기타 질량변화 요인은 반영하지 못한다. PM-10의 경우 가스형태의 대기오염물질에 비해 화학적 반응이 적고 질량변화 요인에 의한 영향을 적게 받기 때문에 확산특성을 가장 잘 반영할 수 있다. 또한 대기오염물질의 확산특성을 모사하는 대부분의 모델링에서는 미세먼지를 대상물질로 적용하고 있으며, 본 연구에서도 이러한 이유로 대상물질을 PM-10으로 적용하였다.

PM-10은 지름 10 μ m 미만의 미세먼지를 말하며, 자동차 배출가스나 공장 굴뚝 등을 통해 주로 배출되고 중국의 황사나 스모그가 심할 때 날아오기도 한다. 이러한 PM-10은 가시거리의 저하와 인체에 직접적인 영향을 미치기도 하지만 장기적으로 금속, 유기산, 이산화질소, 그리고 여타 오염물질과 결합하여 2차 오염물질로 전환된 후 인체 흡입 시 기관지 등에 침착하여 폐기능을 저하시키고 폐암 발생률을 증가시키는 것으로 알려져 있다.

3) 기타 전제사항

산업단지에서 발생된 오염물질의 확산특성을 점 오염원의 관점에서 고찰하며, 외부로부터의 영향 및 내부에서 발생하는 기타 오염원에 대한 영향은 배제한다. 외부로부터의 영향 및 기타 발생원을 모두 고려하기 위해서는 오염물질의 정확한 발생량과 같은 기초자료가 확보되어야 하나, 현재까지 이들에 대한 정확한 자료가 공시되지 않아 자료의 확보가 어렵고 일부 자료 또한 검증절차를 거치지 않아 신뢰성을 확보하기가 어렵기 때문이다.

2. 분석모델

대기오염자동측정망을 통한 실측자료는 각 측정지역만을 대표하는 수치로서 본 연구에서 다루고자 하는 시화산업단지 배후도시의 공간적인 대기오염 농도를 표현하고 분석하는 데에 한계가 있다. 따라서 대기오염의 농도를 추정하기 위해 대기확산 모델로서 미국 환경청(EPA)의 ISCST(Industrial Source Complex Short Term)-3²⁾ 모델을 사용하였으며, 결과해석 및 시각화를 위하여 ESRI사의 ArcGIS 프로그램을 이용하였다.

ISCST-3은 수 시간에서 수일에 해당하는 짧은 기간 동안 기상 변화에 따른 대기질 예측이나 오염물질 누출 사고에 의한 단기간의 대기질 변화 등을 모사할 수 있으며, 대상 지역의 실시간 기상 자료를 이용해 대기오염물질의 모델링이 가능하다. 또한 다양한 오염원 및 지형, 주변 건물 등에 의한 공기역학적 영향을 고려할 수 있으며 점 오염원, 선 오염원, 면 오염원 등 오염원의 입력이 자유롭다. 반면 ISCST-3 모델은 가우시안 분포를 가정하여 대기오염물질의 확산 현상만을 고려하는 것으로 대기중 화학반응 등을 고려하지 못한다는 단점이 있다.

ISCST-3은 도시규모에서의 대기정책, 환경 영향

평가 등 다양한 분야에 이용되고 있으며, 국내외 많은 연구자(김운수, 2004; 오규식 외, 2005)들도 이 모델을 활용하여 대기오염농도를 예측하였다.

3. 분석인자 선정

모델링을 수행하기 위해서는 예측값의 신뢰성을 검증하기 위한 기초수행(Base Run) 단계와 가설설정 단계에 따른 결과도출 단계로 구성된다. 본 연구에서도 기초자료의 입력에 따른 예측값의 신뢰성을 검증하고, 다음과 같은 몇가지 가설을 설정하여 그 결과를 도출하고자 하였다.

첫째, 산업단지의 오염물질 배출원으로부터의 이격거리에 따라 오염도가 다르게 표출될 것이다. 오염물질의 농도는 배출지점에서 가장 높으며, 대기 중으로 확산 및 이동됨에 따라 그 농도가 희석되어 낮아진다. 따라서 배출원으로부터 이격거리가 멀수록 오염도가 낮아지며, 일정거리 이상에서는 평균 대기질과 동일해질 것이다.

둘째, 오염물질이 확산되면서 표출하는 오염도는 고도에 따라 다를 것이다. 일반적으로 대기오염물질은 기류(氣流)를 따라 이동되는 특성이 있다. 또한, 기류는 고도가 높아질수록 속도가 커진다. 따라서 대기오염물질 또한 고도에 따라 확산특성이 다르게 표출될 것이다.

셋째, 대기오염물질의 확산에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 바람(wind)으로서 바람의 방향에 따라 오염물질의 확산패턴이 결정된다.

넷째, 바람에 따라 오염물질이 확산되는 과정에서 녹지의 구성에 따라 오염도의 차이가 발생할 것이다. 녹지의 경우 지표면의 온도저감에 영향일 미치는 요소로, 지표면의 온도가 낮아질수록 대기흐름 특성이 달라질 수 있다. 또한, 녹지는 기류의 흐름에 변화를 줄 수 있어 기류를 따라 이동하는 대기

오염물질의 농도가 다르게 표출될 것이다. 뿐만 아니라, 녹지 자체적으로 대기오염물질의 정화효과가 있다고 보고되고 있어 이 또한 대기오염농도 표출에 영향을 줄 수 있다.

위와 같은 가설에 따라 본 연구에서는 모델링을 수행함에 있어 주요 영향인자로 첫째, 이격거리와 수용지의 높이, 둘째, 산업단지와 배후도시 간의 완충녹지(폭 176m, 길이 3.8km), 셋째, 풍향 등을 선정하였다. 또한, 각 인자별 영향도를 종합하여 풍향에 따른 이격거리별 수용지 높이에 따른 오염도 변화특성을 시각적으로 나타냄으로써 향후 산업단지 인접지역에 주거단지 개발 시 도시계획 기준을 설정하는 방법론을 도출하고자 하였다.

4. 모델링 수행체계

본 연구는 대기오염물질의 대기 확산특성을 파악하기 위하여 ① 기상자료 및 배출자료의 입력, ② 대기확산 모델링 및 ③ 모델링 결과의 시각화의 단계를 거쳐서 수행하였다. 대기확산 모델링 수행에 필요한 입력자료는 기상자료 및 배출량 입력자료로서 각각 2011년 인천기상대 자료 및 2012 CAPSS³⁾ 배출량 자료⁴⁾를 이용하였다

IV. 분석결과 및 고찰

1. 산업단지로부터 이격거리 및 수용지의 높이

1) 산업단지로부터의 이격거리

산업단지로부터의 이격거리에 따른 대기질을 분석하기 위하여 이격거리별 미세먼지(PM-10) 농도와 농도감소율을 분석하여 <그림 3>에 나타내었다.

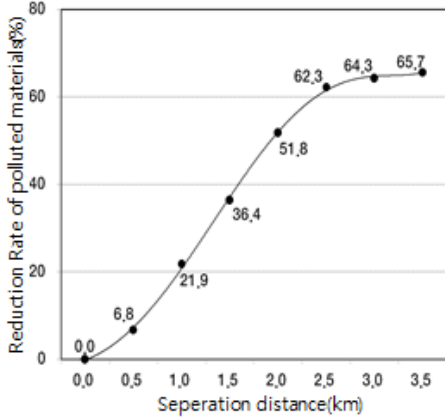


Figure 3. Reduction Rate of polluted materials by separation distance

이격거리는 시화산업단지 중심지역으로부터 배후 도시인 시화신도시의 영향권인 3.5km까지를 0.5km 간격으로 구분하였으며, 대기오염물질의 농도감소율은 기준지점(시화산업단지 중심지역, 이격거리 0km 지점)의 농도를 기준으로 기준지점 대비 이격거리 별 오염원의 농도의 비율이다.

〈그림 3〉에서 알 수 있듯이 오염원인 산업단지로부터 멀어질수록 오염도가 낮아지는 경향이 있음을 확인할 수 있었다. 기준지점의 오염원의 농도 $57.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 는 이격거리 1km, 2km, 3km에서 각각 $44.6\mu\text{g}/\text{m}^3$, $27.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 및 $20.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 감소하였으며, 오염원의 농도 감소율은 각각 21.9%, 51.6% 및 64.3%로 나타났다. 특히 오염원의 농도 감소율은 이격거리 0~2.5km까지는 급격히 증가하였으나, 2.5 km 이상의 이격거리에서는 완만하게 증가하는 것으로 분석되었다.

한편 시화산업단지 중심지역으로부터 이격거리에 따른 대기오염물질의 확산특성을 분석한 결과 대부분의 오염물질이 시화산업단지의 해안가 주변인 북서, 남서 방향으로 이동·확산하는 특성을 나타내었다. 본 연구의 대상지역인 시화산업단지의 경우 해

안에 접하고 있는 지리적 특성을 안고 있으며, 이러한 지리적 특성이 크게 반영된 결과로 판단된다.

이상의 결과를 종합해보면 이격거리에 따른 대기오염물질의 농도감소율의 경향은 산업단지 및 산업단지 배후도시 조성 계획 시 쾌적한 도시환경을 조성하기 위한 입지선정에 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 대기오염물질의 대기확산은 지리적·기상적 특성 등 다양한 영향요인에 의해 발생할 수 있으므로 해안을 접하고 있지 않는 내륙지역에 산업단지와 산업단지 배후도시 조성할 경우 본 연구의 결과와는 다소 상이할 것으로 판단되므로 향후 추가적인 연구를 통한 다양한 입지조건에 따른 영향도 분석이 필요하다.

환경부(2013)에서는 주요 국가별로 오염물질(악취) 배출사업장과 주변의 수용지 간 이격거리 설정 기준을 소개하였다. 뿐만 아니라, 이격거리 설정과 관련하여 기준이 전무한 국내 실정을 고려하여 이와 같은 기준설정이나 방법론의 도입이 필요하다고 주장하고 있다. 이격거리에 따른 대기오염물질의 농도감소율과 같은 본 연구에서 도출된 결과는 오염물질 배출사업장 또는 산업단지와 이격거리 기준 설정에 있어 유용한 정보를 제공할 수 있으며, 도시계획 시 입지선정을 위한 하나의 방법론을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

2) 수용지의 높이

한편 미세먼지의 농도가 수용지의 높이 변화에 따라 어떠한 특성이 있는지를 분석하기 위하여 이격거리별, 수용지 높이별 미세먼지의 농도를 분석하였다. 분석결과 미세먼지의 농도가 유의미한 변화를 갖는 지점은 산업단지로부터의 이격거리 1.5km~2.0 km에서 나타났으며, 이격거리 1.7km~2.0km에서 미세먼지의 농도를 분석한 결과를 〈그림 4〉에 정리하여 나타내었다.

분석결과 수용지의 높이별로 미세먼지의 농도가 각각 차이가 있었으며, 특정 이격거리에서 수용지의 높이별 미세먼지의 농도는 역전현상을 보이고 있는 것으로 나타났다

즉, 수용지의 높이별 대기오염 특성은 이격거리 1.5km까지 수용지의 높이가 높을수록 오염물질의 농도가 높았으나, 이격거리 2.0km 이상부터는 수용지의 높이가 높을수록 오염물질의 농도가 낮아지는 반대의 경향을 나타내었다.

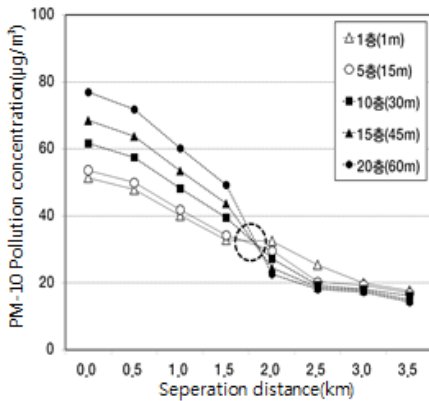


Figure 4. PM-10 pollution concentration by separation distance

한편, 이격거리 1.5km~2.0km에서 대기오염물질의 확산특성이 수용지 높이별로 역전현상을 나타내고 있다. 따라서 두지점 사이의 이격거리를 세분화하여 오염도의 감소특성을 모사하였으며, 그 결과는 <그림 5>에 나타내었다.

분석결과 이격거리 1.7km 부근에서 미세먼지의 농도가 역전되는 변곡점인 것으로 나타났고, 이격거리 1.7km~1.9km 지점에서는 상층부와 저층부의 오염도의 영향이 미세하게 증감되는 것으로 나타났으며, 1.9km 지점에서는 저층부가 상층부보다 오염도 소폭 증가하는 것을 알 수 있다.

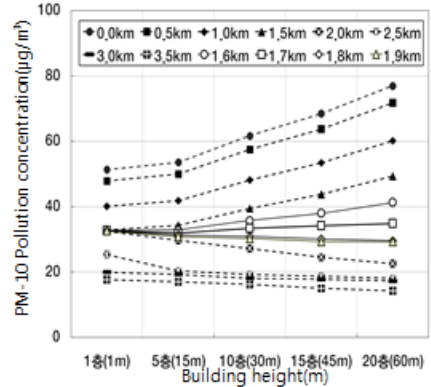


Figure 5. PM-10 pollution concentration by building height

특히, 2.0km 지점부터는 저층부의 오염도가 뚜렷하게 높은 것으로 나타났고, 이격거리 3.0km~3.5km 지점에서는 모든 건물의 높이에서 오염물질의 영향이 미비한 것으로 나타났다. 이는 오염물질이 최대 착지농도 거리에 도달한 것을 의미한다.

따라서 이격거리별 건물의 높이에 따른 오염도 영향 분석의 결과는 향후 도시계획 수립 시 오염원으로부터 이격거리에 따라 건물의 높이를 조정하여 이격거리별 개발밀도, 건축물의 높이계획 및 토지이용계획 등에 중요하게 활용 가능할 것으로 판단된다.

2. 산업단지와 배후도시 간의 완충녹지

1) 완충녹지의 효과

산업단지와 배후도시 간 녹지의 설치기준은 시대에 따라 변화되어 왔으며, 「기업활동 규제완화에 관한 특별조치법」 제21조 완화 기준 적용한 현재의 녹지설치 기준은 <표 1>과 같고, 단순히 산업단지의 개발규모에 따른 면적비율만을 제시하고 있다.

Table 1. Standard of industrial complex development planning

구분 Classification	산업단지 규모 Area	계획기준 Ratio
녹지율 Park and Green Area	3km ² 이상 3km ² or over	10.0~13.0%
기반시설계획 Facility Area	1km ² ~3km ²	7.5~10.0%
배후도시개발계획 Dwelling and Commercial Area	1km ² 미만 under 1km ²	5.0~7.5%

이에 본 연구에서는 산업단지와 산업단지 배후도시 간 완충녹지의 설치가 대기질 개선에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하여, 향후 도시계획 시 활용하고자 하였다. 이를 위하여 <그림 6>과 같이 시화 산업단지의 중심지역으로부터 완충녹지 설치 지역 3개소와 미설치 지역 2개소 등 총 5개소의 수용지점에 대하여 시간별 대기오염물질의 농도변화를 분석하였다.

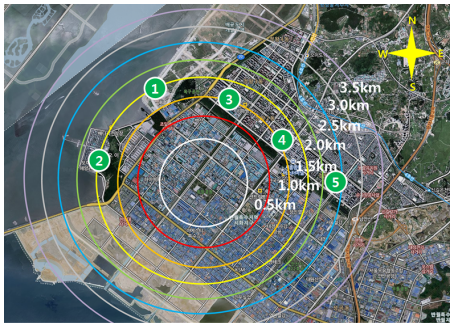


Figure 6. Case study spot of buffer green effect analysis

완충녹지의 설치효과를 분석하기 위한 수용지점별 미세먼지의 농도분포를 시간에 따라 분석한 결과는 <그림 7>과 같다.

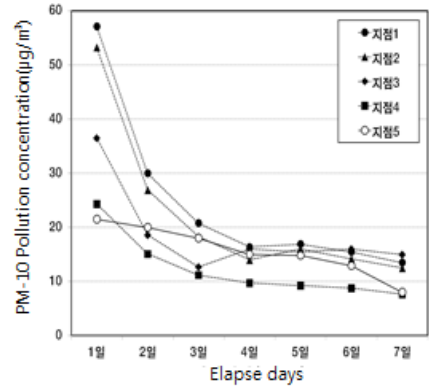


Figure 7. PM-10 pollution concentration by elapse days

수용지 지점1, 지점2, 지점3은 시간이 지남에 따라 PM-10 농도가 낮아져 확산이 활발하게 이루어지고 있는 것으로 판단되나, 지점4에서는 확산속도가 느리게 진행되고, 지점5는 시간이 지남에 따라 농도의 변화가 거의 없는 상태로 유지되어 확산이 잘 이루어지지 못하고 있는 것으로 판단된다.

수용지 지점별로 살펴보면, 완충녹지 미설치 수용지인 지점1과 지점2는 해안가에 가깝게 위치하여 해륙풍의 영향 등으로 자연적으로 확산현상이 활발하게 일어나는 것으로 판단된다. 지점3~5의 경우 모두 완충녹지가 설치된 지점으로 지점4와 지점5는 완충녹지에 의해 현저하게 확산이 저해되고 있는 것으로 분석된다. 즉 시화산업단지의 평균 연돌의 높이는 10.68m이고, 현재 설치된 완충녹지의 축산고가 수고를 포함하여 약 15m인 점을 감안하면, 시화산업단지에서 발생하는 미세먼지가 완충녹지에 의해 차단되고 있는 것으로 추정할 수 있다.

2) 완충녹지 폭에 따른 대기확산 특성

녹지면적 증가가 대기오염물질의 확산에 미치는 영향요인을 파악하기 위하여 본 분석대상지인 시화 산업단지의 완충녹지의 폭을 조정하여 수용지점별

대기확산 특성을 아래의 가정하에서 분석하였다.

첫째, 시화산업단지의 완충녹지는 길이방향으로 3,464m이며, 폭원은 175~225m이나 분석을 위하여 완충녹지 총연장 3,500m, 폭 200m로 가정하였다. 즉 시화산업단지의 완충녹지 면적은 0.7km²로 가정하고 폭원의 변화에 따라 대기오염물질의 확산특성을 분석한다.

둘째, 선행연구 결과로부터 완충녹지의 면적에 따른 도시의 온도저감 정도를 분석하여 입력조건으로 기온을 감소시켜 간접적으로 대기오염물질의 확산특성을 분석하고자 하였다. 김학열(2003)과 박종훈(2013)의 연구결과로부터 다른 모든 변수는 불변이라는 가정 하에 완충녹지의 면적만 변화했을 때 기온변화값으로부터 완충녹지의 폭을 결정하였다. 즉 완충녹지의 면적비율 1%의 증가할 경우 대기온도는 0.02% 감소하며, 평균기온은 25℃로 가정하여 구한 시화산업단지의 완충녹지 면적에 따른 대기온도 변화는 <표 2>와 같다.

Table 2. Temperature change by buffer green, width

구분 Classification	기준 Standard	10% 증가 10% Rate of increase	20% 증가 20% Rate of increase	30% 증가 30% Rate of increase	40% 증가 40% Rate of increase
완충녹지면적(km ²) Buffer green Area(km ²)	0.70	0.77	0.84	0.91	0.98
완충녹지 폭(m) Buffer green Width(m)	200	220	240	260	280
온도변화 값(℃) Temperature Change(℃)	0	-1	-2	-3	-4
비고 Notes	BR-0	BR-1	BR-2	BR-3	BR-4

셋째, 완충녹지의 폭에 따른 대기오염물질의 확산특성의 분석에서는 수용지의 높이를 15m로 고정하고 수용지점별 오염원의 농도를 분석하였다.

산업단지과 산업단지 배후도시 간 완충녹지의 폭에 따른 대기오염물질의 확산특성을 모델링 한 결과를 <그림 8> ~ <그림 12>에 정리하였다. 이들 그림에서 알 수 있듯이 완충녹지의 폭(면적 및 기온) 변화에 따른 오염물질의 확산특성은 Base Run(BR-0)과 비교하여 다소 차이를 보이고 있음을 알 수 있다.

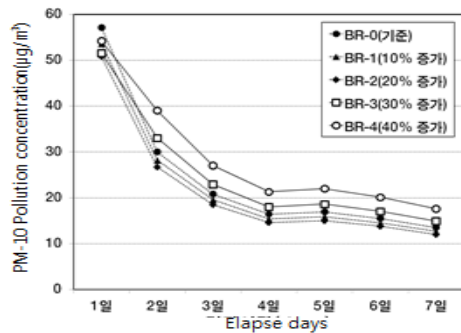


Figure 8. PM-10 pollution concentration by elapse days and buffer green, width(spot1)

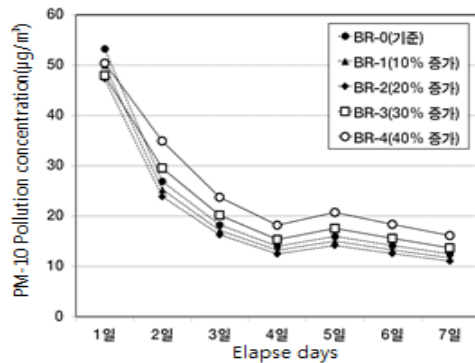


Figure 9. PM-10 pollution concentration by elapse days and buffer green, width(spot2)

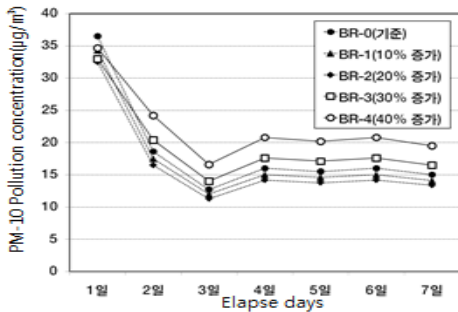


Figure 10. PM-10 pollution concentration by elapse days and buffer green, width(spot3)

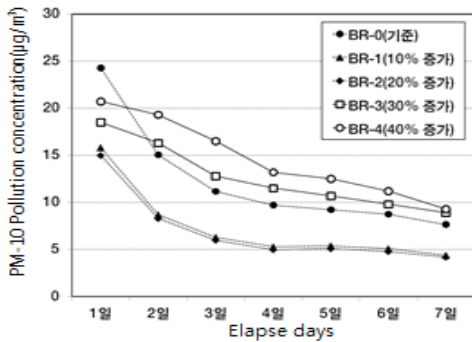


Figure 11. PM-10 pollution concentration by elapse days and buffer green, width(spot4)

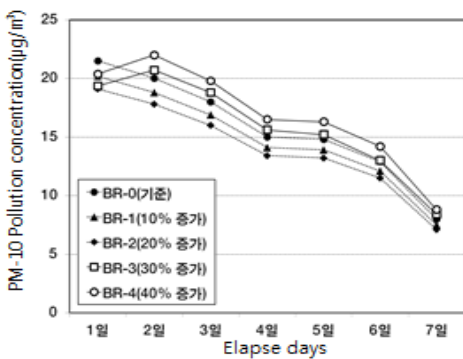


Figure 12. PM-10 pollution concentration by elapse days and buffer green, width(spot5)

수용지점별로 살펴보면, 완충녹지 유무에 따른 대기확산 특성과 유사한 특성을 나타내고 있는 반면, 각 수용지점별로 기온변화에 따른 확산 특성은 기온 2°C 저감인 BR-2에서 대기질 개선효과가 가장 크게 나타났다. 이와 같은 결과는 완충녹지의 면적이 일정 면적 이상 증가할 경우 대기질 개선에는 효과가 없는 것으로 추정된다. 즉 산업단지와 산업단지 배후도시 간 완충녹지를 계획할 때 완충녹지의 유효 폭이 있다는 것을 암시하며, 효율적 토지이용과 완충녹지의 조성비 측면에서 중요한 데이터로 활용 가능할 것으로 판단된다.

본 연구 대상지인 시화산업단지와 시화신도시를 중심으로 완충녹지 폭을 검토한 결과 현재 설치된 완충녹지 폭 200m 보다 40m를 확장한 240m로 가정하였을 때 대기질 개선이 가장 효과적인 것으로 분석되었다. 이에 산업단지와 산업단지 배후도시를 계획할 때는 완충녹지 면적뿐만 아니라 폭에 대하여 검토한 후에 완충녹지를 설계할 필요가 있을 것으로 판단된다.

3. 풍향

산업단지 중심지역으로부터 대기오염물질의 확산에 대한 풍향의 영향을 분석한 결과를 정리한 것이 <그림 13> ~ <그림 16>이다.

동서남북 4가지 방향으로 단방향 풍향 조건을 적용한 결과 동풍, 남풍, 북풍의 경우 풍향의 반대 방향으로 오염물질이 확산되는 경향을 나타내었다.

그러나 서풍의 경우 풍향에 대하여 뚜렷한 특성이 나타나지 않았으며, 북풍과 유사한 특성을 나타내었다.

이는 정왕동의 지리적 특성과 기상적 특성을 그대로 두고 풍향만을 임의로 조정한 결과로서 풍향에 따라 주 확산 방향은 큰 차이를 보이지 않

지만 확산 범위는 상이한 결과를 보여주는 것으로 해석할 수 있다. 또한 정적 대기에 잘 적용되는 확산모델을 사용한 모델링 결과로 이점을 고려하여 정책에 반영할 필요가 있으며, 향후 이에 대한 보완 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4. 풍향, 이격거리, 수용지점의 높이별 대기 오염도 특성

풍향조건별로 이격거리에 따른 수용지점의 높이별 대기오염도 특성을 분석한 결과는 <그림 17> ~ <그림 20>에 나타내었다.

풍향조건별로는 동풍과 남풍일 때 서로 유사한 특성을 보였고, 북풍과 서풍 조건에서 서로 유사한 결과를 나타내었다. 이격거리에 따른 오염도 분포는 모든 풍향조건에서 2.0km 지점을 기점으로 하층부의 오염도가 상층부의 오염도보다 높게 분석되었다.

다만, 서풍과 북풍조건에서 동풍과 남풍일 경우 보다 상·하층부간 오염도 차이가 낮아지는 것으로 나타났다. 오염물질의 농도측면에서는 동풍 및 남풍이 기준 풍향일 때 서풍이나 북풍인 경우보다 근거리에서 고층부에 높은 농도분포를 보였으나 그 차이는 크지 않은 것으로 분석되었다.

이 같은 결과는 본 연구의 가설조건과 일치하는 결과로, 도시계획 시 근거리지점과 원거리지점에서의 층고계획에 중요한 단서를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

V. 결론

본 연구는 산업단지 및 산업단지 배후도시 개발 시 쾌적한 도시환경을 조성하기 위하여 미세먼지(PM-10)를 중심으로 대기확산모델인 ISCST-3을 이용하여 중요 영향인자별 배후도시의 대기질 개선

정도에 대하여 분석하였다. 중요 영향인자로는 산업단지로부터의 이격거리, 수용지의 높이, 완충녹지 및 풍향 등을 선정하였으며, 각각 영향인자별 미세먼지의 노출농도를 중심으로 산업단지 배후도시의 도시계획 방향을 검토한 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 산업단지(오염원)로부터의 이격거리와 수용지(배후도시)의 높이(층고)별 대기오염물질의 확산 특성을 고려한 도시계획 방안이다. 오염원으로부터 거리에 따른 대기오염 농도를 분석한 결과 오염원으로부터 이격거리가 1.7km를 기점으로 대기오염물질의 높이별 농도가 크게 차이가 나타난 특성 등을 감안하여 향후 도시계획 시 건축물의 높이 제한을 오염원으로부터의 이격거리에 따라 다양하게 설정할 필요가 있다. 즉 건축물의 높이는 이격거리 1.7km 이내에서는 5~10층(15~30m)으로, 이격거리 1.7km 초과지역에서는 10층(30m) 이상으로 계획함으로써 쾌적한 도심 주거환경을 조성할 수 있을 것으로 사료된다.

둘째, 산업단지와 산업단지 배후도시 간에 완충녹지를 설치하여 산업단지로부터 발생하는 대기오염물질을 1차적으로 차단하여 쾌적한 배후도시를 조성하는 도시계획 방안이다. 본 연구의 대상지역인 정왕동의 경우 산업단지와 배후도시의 경계에 북서-남동 방향으로 높이 10m 정도의 완충녹지가 조성되어 있으며, 완충녹지가 산업단지에서 배후도시 주거지역으로 저층부 대기오염물질이 확산하는 것을 차단하는 효과가 있는 것으로 분석되었다. 반면, 저층부의 대기오염물질 저감효과는 있으나 고층부의 저감효과는 극히 미약한 것으로 분석되었으며, 이는 완충녹지의 높이에 의한 영향이 큰 것으로 추정된다. 또한 완충녹지의 폭에 대하여 추가적으로 검토한 결과 현행 200m보다 40m 확장한 240m의 경우가 대기질 개선에 가장 효과적일 것으로 분석되었다.

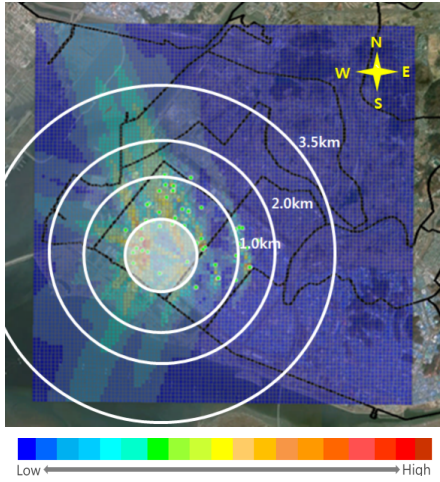


Figure 13. Dispersion characteristics of PM-10 in east wind condition

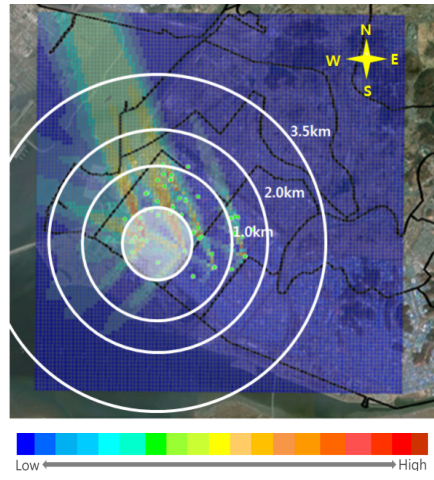


Figure 14. Dispersion characteristics of PM-10 in west wind condition

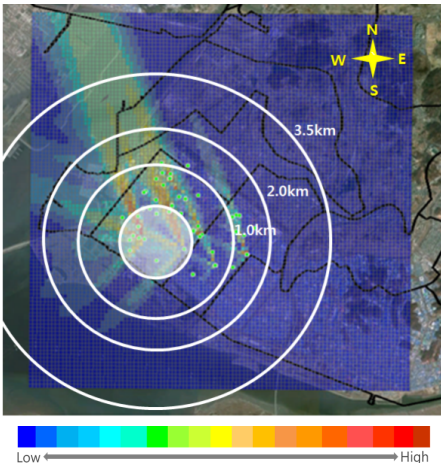


Figure 15. Dispersion characteristics of PM-10 in south wind condition

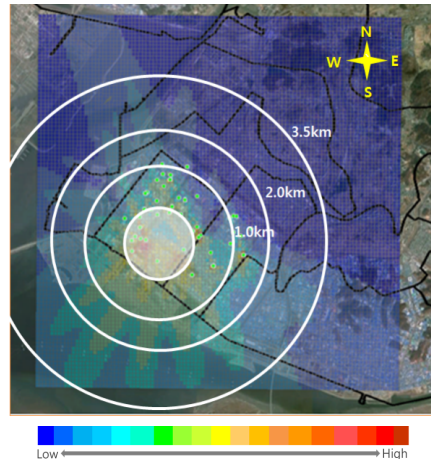


Figure 16. Dispersion characteristics of PM-10 in north wind condition

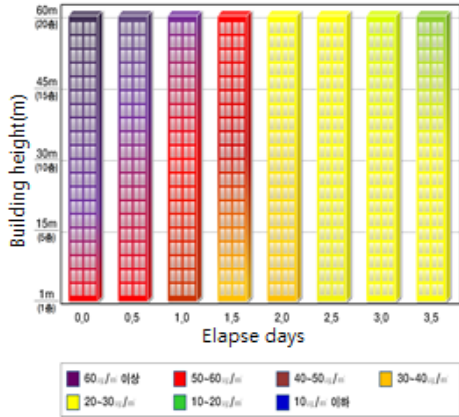


Figure 17. Dispersion characteristics of PM-10 by separation distance and building height in east wind condition

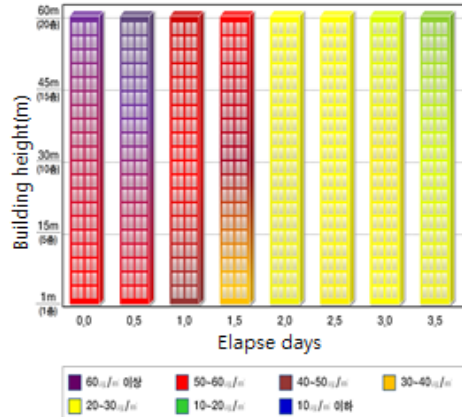


Figure 18. Dispersion characteristics of PM-10 by separation distance and building height in west wind condition

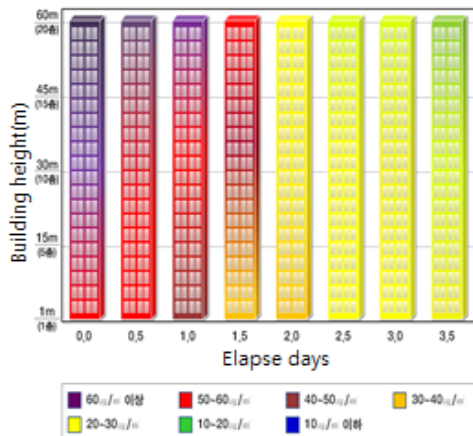


Figure 19. Dispersion characteristics of PM-10 by separation distance and building height in south wind condition

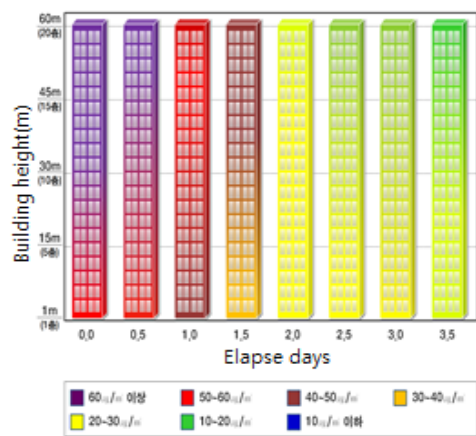


Figure 20. Dispersion characteristics of PM-10 by separation distance and building height in north wind condition

이러한 결과는 향후 도시계획 단계에서부터 적용할 필요가 있다. 즉, 고층건물 위주로 조성되는 최근의 도시개발 추세를 고려했을 때, 완충녹지의 효과를 충분히 이끌어 내기 위해서는 완충녹지의 대기오염물질 차단성과 설치비용 등을 감안하여 완충녹지의 높이와 면적(길이, 폭)을 종합적으로 고려하여 설치할 필요가 있다. 또한 완충녹지의 높이와 면적(길이 및 폭)에 대하여 추후 더 많

은 연구결과를 바탕으로 도시계획 단계에서 반영할 필요가 있을 것으로 사료된다.

셋째, 산업단지 배후도시 개발 시 바람의 영향범위를 고려하는 도시계획 방안이다. 대기오염물질 확산 모델링 결과 오염물질의 확산은 지형적 특성과 기상변수 중 바람의 영향을 크게 받는 것으로 분석되었다. 본 연구에서 임의의 풍향을 설정하여 시뮬레이션을 수행한

결과 지형적 특성에 따라 오염물질의 확산정도가 크게 차이나는 것으로 분석되었다. 향후 산업단지와 인접한 도시계획 시 지형적 특성을 충분히 고려하여 오염원을 배출하는 산업단지를 중심으로 오염물질의 확산이 가장 빠른 방향으로 계획도시의 입지를 선정할 필요가 있을 것으로 사료된다.

한편 기존 연구자들은 도시화와 관련된 대기오염 특성과 이를 저감하기 위한 방법론 제시에 중점을 두고 있으나, 본 연구는 산업단지와 인접한 배후 주거단지 개발에 있어 대기오염물질의 확산특성을 고려하여 입지를 선정하고 층고 및 이격거리를 계획하도록 방향을 제시한 데 가장 큰 의의를 두고 있다.

반면, 본 연구에서는 특정지역 및 특정기간의 기상조건이나 대기오염물질 배출량정보를 활용함으로써 일반화하여 적용하는 데 한계를 가지고 있다. 따라서 향후 유사한 지역의 도시계획에 적용하기 위해서는 대상지역의 지리적, 기상적 조건 등을 심도있게 고려하여 분석할 필요가 있다.

분석대상물질(PM-10)은 산업단지뿐만 아니라 교통, 비산먼지, 황사 등 다양한 오염원에 의해 발생된다. 본 연구에서는 모든 발생원별 기여도를 적용하는 데 한계가 있어 산업단지라는 제한적인 오염원만을 적용하였다. 따라서 향후 산업단지 뿐만 아니라 기타 오염원의 기여도 등을 고려한 연구를 진행할 필요가 있다.

주1. 도시열섬 현상: 도시 중심부 기온이 주변 지역보다 현저히 높게 나타나는 현상으로, 여름보다 겨울철에 낮보다 밤에 뚜렷하게 나타나는 현상
 주2. ISCST-3: EPA에서 제공하는 Alternative Model 중의 하나로 다양한 오염원으로부터의 오염물질 농도를 평가하는데 이용되는 가우시안 플룸(Gaussian plume) 모델 (www.epa.gov/ttn/scram/dispersion_alt.htm#isc3)

주3. CAPSS: 대기정책지원시스템(Clean Air Policy Support System)을 지칭하며, 대기오염물질 배출원 목록(emission inventory)에 근거한 대기질 관리 종합시스템으로서의 기능과 역할을 수행하도록 하기 위해 환경부(국립환경과학원)에서 개발한 대기환경예측평가시스템
 주4. 배출량 자료: 대기오염물질별로 지역별, 배출원별 배출량을 매년 파악하여 국가 공식 통계자료이며, 관리기관은 국립환경과학원임 (airemiss.nier.go.kr/main.jsp)

인용문헌

References

1. 김운수, 2004. 「서울시 미세먼지 배출량 조사분석 및 관리방안 연구」, 서울: 서울시정개발연구원.
 Kim, Un Soo, 2004. *Study on PM10 emission inventories and management strategies in Seoul*, Seoul: The Seoul Institute.
 2. 김재철·이종범·천태훈·장윤정, 2010. “도시개발에 따른 대기환경변화가 건강에 미치는 영향 연구”, 「환경영향평가」, 9(1): 15-28.
 Kim, J. C. and Lee C. B. and Cheon T. H. and Jang Y. J., 2010. “A Study about the Impact of Atmospheric Environmental Changes by Urban Development on Human Health”, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 9(1): 15-28.
 3. 김학열, 2003. “도시환경인자에 따른 대기온도 변화 연구-서울시를 대상으로”, 「국토계획」, 38(5): 259-269.
 Kim, H. Y., 2003. “A study about the impact of atmospheric environmental changes by Urban development on human health”, *Journal of Korea Planning Association*, 38(5): 259-269.
 4. 박일건·홍민선·김범석·강호근, 2012. “터널 내 대기오염물질의 공간분포 예측”, 「한국터널지하공간학회 논문집」, 14(6): 607-616.
 Park, I. G. and Hong, M. S. and Kim, B. S. and Kang, H. G., 2012. “Prediction of spatial distribution of air pollutants within tunnel”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, 14(6):

- 607-616.
5. 박종훈, 2013. “도시블록 단위에서 소규모 녹지가 기온저감에 미치는 효과”, 서울대학교 박사학위논문.
Park, J. H., 2013. “Air temperature reduction effects of small green spaces in urban blocks of Seoul”, Ph.D. Dissertaton, Seoul National University.
 6. 오규식·구자훈·조창제, 2005. “도시형태 구성요소가 지역별 대기오염에 미치는 영향”, 「국토계획」, 40(3): 159-170.
Oh, K. S. and Koo, J. H. and Cho, C. J., 2005. “The effects of urban spatial elements on local air pollution“, *Journal of Korea Planning Association*, 40(3): 159-170.
 7. 윤희한, 2000. “공원에 의한 고온성 저감효과에 관한 연구”, 「한국정원학회」, 18(1): 83-99.
Yoon, Y. H., 2000. “Thermal effect of open space in urban area“, *Korea Institute of Traditional Landscape Architecture*, 18(1): 83-99.
 8. 유희천·김민규·정갑용, 2013. “도시열섬 완화를 위한 녹지증가에 따른 온도변화 분석”, 「한국측량학회지」, 31(2): 143-150.
Yun, H. C. and Kim, M. G. and Jung, K. Y., 2013. “Analysis of temperature change by forest growth for mitigation of the urban heat island“, *Korean Journal of Geometrics*, 31(2): 143-150.
 9. 정성호·고석찬, 2011. “산업단지 배후도시 주거환경 만족도 분석-시화산업단지 및 배후도시 사례를 중심으로”, 「현대사회와 행정」, 21(1): 49-69.
Jung, S. H. and Ko, S. C., 2011. “Analysis of the residentail amenities of industrial town – the case of Sihwa industrial new town“, *Modern Society and Administrative*, 21(1): 49-69.
 10. 주현수·김석철·반지영·최순심, 2006. 「도시지역에서의 바람길과 대기질 영향에 관한 연구」, 서울: 한국환경정책평가연구원.
Joo, H. S. and Kim, S. C. and Ban, J. Y. and Choi, S. S., 2006. *A study on wind flow and air quality in urban terrain*, Seoul: Korea Environment Institute.
 11. 문난경, 2013. 「약취영향을 고려한 약취관리 가이드라인 마련」, 서울: 환경부.
Mun, N. G., 2013. “Guidelines on the odor management considering odor effects“, Seoul: Ministry of Environment.
 12. Brian Stone Jr, 2008. “Urban sprawl and air quality in large US cities”, *Journal of Environmental Management*, 86: 688-698.
 13. Jerrett M., Arain A., Kanaroglou P., 2007. “Modelling the intra-urban variability of ambient traffic pollution in Toronto, Canada”, *Journal of Toxicology and Environmental Health Part A*, 70: 200-212.
 14. Mats Rosenlund, Francesco Forastiere, Massimo Stafoggia, Daniela Porta, Mara Perucci, Andrea Ranzì, Fabio Nussio, and Carlo A Perucci, 2008. “Comparison of regression models with land-use and emissions data to predict the spatial distribuion of traffic-relate air pollution in Rome”, *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 18: 192-199.
 15. Michael Brauer, Gerard Hoek, Patricia van Vliet, Kees Meliefste, Paul Fischer, Ulrike Gehring, Joachim Heinrich, Josef Cyrys, Tom Bellander, Marie Lewne, and Bert Brunekreef, 2003. “Estimating Long-term average particulate air pollution concentrations: Application of traffic indicators and geographic information systems”, *EPIDEMIOLOGY*, 14(2): 228-239.

Date Received 2016-10-05
 Date Reviewed 2016-11-04
 Date Accepted 2016-11-04
 Date Revised 2016-11-22
 Final Received 2016-11-22