

대기오염을 고려한 도시의 환경적 수용력 산정 연구

An Assessment of Environmental Carrying Capacity by Analyzing the Emission and Concentration of Urban Atmospheric Pollutants

이광호¹ · 정연우²Kwang-Ho Lee¹ and Yeun-Woo Jeong²

(Received August 16, 2011 / Revised October 18, 2011 / Accepted October 25, 2011)

요 약

도시의 무분별한 개발로 인해 수도권의 주요도시는 환경문제를 겪고 있다. 이 중 대기오염은 도시민들이 신체적·경제적 피해를 받고 살아가게 되는 원인으로 작용하고 있다. 이에 인간활동으로 인해 배출되는 대기오염물질을 도시환경이 어느 정도 수용가능한지 예측하고, 이를 통해 적정 도시개발 수준을 검토할 필요성이 제기되고 있다. 본 연구는 대기오염물질 배출량에 따라 대기오염의 양상이 다르게 나타날 것이란 전제 하에, 경기도 과천시를 대상으로 대기환경기준 하에서 허용가능한 대기오염물질 배출량을 산정하고, 이를 기반으로 적정 인구규모를 도출하였다. 분석 결과는 다음과 같다. 첫째, IDW 보간법을 통해 일산화탄소(CO), 이산화질소(NO₂), 아황산가스(SO₂) 농도를 추정한 결과 과천시 전체적으로는 대기환경기준을 초과하지 않는 것으로 나타났다. 둘째, 대기오염물질 배출량과 농도와의 상관분석 결과 일산화탄소(CO)와 이산화질소(NO₂) 농도는 이동오염원과 총오염원, 아황산가스(SO₂) 농도는 이동오염원과 상관관계가 높은 것으로 나타났다. 셋째, 회귀분석을 통해 대기환경기준 하에서 대기오염물질 배출량을 산정하고 이를 기반으로 지탱가능한 인구수를 산정한 결과, 일산화탄소(CO)의 경우 지탱가능인구수가 실제 인구수보다 높게 나타났고, 이산화질소(NO₂)와 아황산가스(SO₂)의 경우는 주거지와 상업시설이 밀집된 도심부와 경계부에서 지탱가능한 인구수를 초과하는 것으로 나타났다. 본 연구를 통해 시도된 환경용량 측정은 대기환경기준 하에서 어느 정도의 인간활동이 적절한 수준인지를 제시해 주었다는데 의의가 있다. 이를 통해 도시환경이 지니는 용량의 범위 내에서 개발행위를 관리함으로써 지속가능한 도시개발이 가능할 것이다.

주제어 : 대기오염농도, IDW보간법, 대기오염물질, 회귀분석, 대기환경용량

ABSTRACT

Indiscreet developments cause environmental problems in major cities of Seoul Metropolitan Area. Among the environmental problems, the air pollution leads the citizens' physical and economic damages. Therefore, it needs to predict how much air pollutant which is emitted from human activities can be carried by urban environment, then to examine the reasonable level of urban development. This study assumed that the air pollution is represented differently by the amount of emission. With the assumption, the acceptable air pollutant emission which keeps the air quality under the environmental standard is estimated, then the proper population is calculated in the case of Gwacheon, Gyeonggi. The result is as follow: First, air pollution concentrations of CO, NO₂, SO₂ which are estimated by using IDW interpolation of GIS don't exceed the air environmental standard. Second, the result of correlation analysis between air pollutant emission and air pollution concentration shows that CO and NO₂ has high correlation with total source of pollution and linear source of pollution, and SO₂ with linear source of pollution. Third, the results of regression analysis show that the acceptable population is bigger than the real population in the case of CO, and with the estimation of NO₂ and SO₂, the current population in the urban center and boundaries where the residential and commerce land uses are concentrated is bigger than the acceptable population. The consequence of this study is that the estimation of carrying capacity can suggest the acceptable human activities which keep the air quality under the environmental standard. This can lead the sustainable urban development by control the human activities under the carrying capacity of urban environment.

Keywords: Air pollution concentration, IDW interpolation, Air pollutant, Regression analysis, Atmospheric environmental carrying capacity

1) 토지주택연구원 연구원(주저자: lkh_80@nate.com)

2) 토지주택연구원 수석연구원(교신저자: ywjeong@lh.or.kr)

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

우리나라의 수도권내 주요 도시들은 과도한 개발로 인해 환경문제를 겪고 있다. 자원의 무분별한 남용과 환경용량을 초과하는 인간의 활동은 환경문제를 더욱 심각하게 만들고 있다. 도시가 지탱할 수 있는 환경용량을 초과한 인간활동은 도시민이 누릴 수 있는 적정 수준의 삶의 질을 침해하고, 자원의 회복속도를 늦추게 된다. 이같은 환경문제가 나타나면서 환경용량을 고려한 지속가능 개발의 필요성이 대두되고 있다.

우리나라의 환경문제는 도시지역에 집중되어 있다. 도시지역은 좁은 지역에 많은 인구와 시설이 밀집되면서 오염물질이 특정지역에 다량 배출되기 때문에 도시관리 측면에서 환경을 고려한 접근이 필요하다. 수도권은 국토의 12%에 불과한 면적에 인구와 자동차의 47%가 집중되어 있어 이미 환경용량을 초과한 상황이며, 특히 서울의 대기오염은 국내 다른 대도시 지역에 비해 높은 수준으로 특별한 관리가 요구되고 있다(환경부, 2006). 실제 수도권의 미세먼지로 인한 조기 사망자수는 연간 1만여 명에 이르며(경기개발연구원, 2003), 이로 인한 사회적 비용은 연간 10조원으로 추산된다는 연구결과(한국환경정책평가연구원, 2002)가 발표되기도 하였다.

이같은 환경여건 하에 1980년대 이후 대기질 개선을 위한 많은 노력이 있어 왔다. 서울시의 경우, 청정연료 보급 등을 통해 아황산가스(SO₂) 농도수준을 크게 개선하여 1993년 이후 세계보건기구(WHO) 권고기준 이내로 유지하고 있다. 하지만 자동차의 급격한 증가로 이산화질소(NO₂)와 오존(O₃) 수치가 높아짐에 따른 오존주의보의 발령과 시정장애현상 등 시민이 느끼는 체감오염은 여전히 개선되지 않고 있다. 이에 정부는 「수도권대기환경개선에관한특별법」을 제정(2003.12)하고, 서울-인천-경기일부지역(15개시)을 「대기환경보전법」에 의거 “대기환경규제지역”으로 설정하여 자치단체별로 ‘실천계획’을 수립토록 하고 있다. 이러한 노력에도 불구하고 수도권 대기오염은 쉽사리 개선되고 있지 않으며, 지속적인 경제성장과 도시개발로 인해 대기질은 더욱 악화되고 있는 실정이다. 이는 우리나라의 대기오염 정책이 대기오염과 밀접한 관계를 맺고 있는 도시개발 상황에 따른 에너지소비 변화를 제대로 고려하지 못하고 있는데 그 원인이 있다고 할 수 있다(고윤화, 2001). 따라서 효율적인 대기질 관리와 도시민 삶의 질 확보를 위해서는 대기오염과 인간활동의 관계를 분석하고, 이에 기초한 도시차원의 근본적인 정책을 수립할 필요가 있다.

이에 본 연구는 적정 대기환경기준 하에서 도시가 지탱할 수 있는 환경적 수용력을 파악함으로써 효과적인 도시 관리 방안 수립을 위한 기초를 제공하고자 한다. 이를 위해 첫째,

대기오염측정망 자료를 이용하여 대기오염농도를 추정하였고, 둘째, 대기오염물질 배출량과 농도와의 관계를 분석하였으며, 셋째, 대기환경기준 하에서 대기오염물질 배출량을 추정하고 이를 기반으로 대상지가 지탱할 수 있는 수용력, 즉 지탱가능한 인구수를 산정하였다¹⁾.

1.2 선행연구 검토

수용력 관련 연구들은 크게, 수용력의 개념 및 정의, 수용력의 적용 및 한계 등 이론적인 연구와 수용력 평가방법의 구축, 도시시설 및 서비스에 대한 수용력 평가 등 실질적인 수용력 분석 연구로 구분 할 수 있다(표 1 참조). 한편 대기오염 관련 연구들은 크게 대기오염 확산 및 공간분포에 관한 연구²⁾와 대기오염 저감을 위한 기법연구³⁾로 나누어 살펴 볼 수 있다. 이상의 선행연구들은 각각의 영역내에서의 개별적 분석에 한정되었으며, 두 영역을 연계 분석한 연구는 미미한 실정이다. 이에 본 연구는 대기환경을 고려한 수용력 평가를 통해 구체적인 인구지표를 제시함으로써 향후 도시 관리방안 수립에 기여하고자 한다.

2. 수용력 개념 및 유형

2.1 수용력의 개념

2.1.1 수용력 개념의 발전

수용력의 개념은 생산 한계치부터 지속가능한 개발까지 그 개념이 발전되어 왔다.

첫째, 생산 한계치로서 개념으로는 Vogt(1948)가 제안한 일정 지역공간내의 인간생활을 창조적인 방향으로 이끌며 보호할 수 있는 토지능력(land ability: C) 개념을 들 수 있다. 여

- 1) 구체적으로 경기도 과천시를 대상으로 사례연구를 수행하였다. 대기오염농도는 대기오염측정소 자료와 과천시 자원정화센터의 대기오염농도 조사자료를 이용하여 구축하였으며, 대기오염물질 배출량은 국립환경과학원의 배출량 자료(1km×1km)를 이용하여 산정하였다.
- 2) Lin(2002)은 Taiwan의 Taichung을 대상으로 Caline-4를 이용하여 이동배출원에 의해 배출되는 오염물질의 공간적 확산을 분석하였으며, 오성남(2000)은 서울시를 대상으로 지역내 바람의 국지순환과 오염물질의 확산정도를 모의실험을 통해 분석하였다. 오규식 외(2005)는 토지이용, 건축물, 교통, 지형 등의 도시형태요소와 대기오염물질 중 이산화탄소(CO), 아황산가스(SO₂), 이산화질소(NO₂) 농도와 상관관계를 분석하였다.
- 3) 시정개발연구원(2000)은 기상조건을 고려한 도시계획의 가이드라인을 제시하고 나홀로 아파트 입지에 따른 주변 미기후 변화영향을 분석하였다. 도시계획기법을 고려한 대기오염저감에 관한 연구(고성석, 2001; 김운수, 2001)는 건축물의 배치, 높이, 녹지의 분포 등 도시지역의 특성과 기상특성을 대기오염 확산에 고려하였으며, 도시의 인공구조물에 의한 대기오염농도의 변화를 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 분석하였다.

표 1. 수용력 관련 연구동향

연구자	주요내용
Godschalk & Parker, 1975	수용력 개념의 정의 및 유형, 응용분야, 이론 및 계획방법. 계획에서의 수용력 개념적용을 위한 가정
정순오, 1983; Chung, 1988	환경계획이론으로서의 수용력의 개념 및 유형, 수용력의 측정방법 및 모형. 환경관리에 대한 수용력 적용의 일반과정
Catton, 1987	수용력의 개념과 부하와의 관계
Onishi, 1994	다양한 도시시설과 서비스(상·하수도, 폐기물처리시설, 지하철, 도로, 대기오염, 주택)에 대한 용량적 접근방법
Wackernagel and Rees, 1996	생태적 발자국(ecological footprint)의 정의, 계산방법 및 적용. 생태적 발자국 분석을 통한 선진국이 끼치고 있는 환경에의 영향 검토
오규식, 1996	누적영향의 관리, 시각적 한계수용능력의 개념. 도시경관의 시각적 한계수용능력 설정과 운용
최막중·김진유, 1999	기반시설(도로, 지하철, 상수도, 하수도)과 개발규모의 함수관계를 통한 개발용량 산정식 수립. 사례지역을 대상으로 모의실험을 통해 실제 개발용량을 산정
김선희, 1999; 최영국, 1999	환경용량(environmental capacity)의 개념(한계용량, 수용력), 활용동향 및 해외 사례. 환경용량평가의 의의 및 과제, 환경용량 추정 한계 및 환경용량 해석의 새로운 방안
서울시정개발연구원, 1999	서울시 성장관리와 지속가능한 개발수단으로서 환경용량평가의 정책적 의미 제시. 서울시의 자연환경용량, 기반시설용량 및 서비스 공급능력 평가. 생태적 발자국(ecological footprint)지수, 에머지(emergy) 흐름 분석, 오니시 모형
정연우, 2004	수용력 개념을 환경 및 시설을 중심으로 서울시 강남구의 대기질, 공원, 도로, 지하철, 상하수도에 적용 및 개발가능밀도 평가
이왕기, 2005	수용력 개념을 도시주거지역의 시설,서비스 수용력 평가. 도로, 상하수도, 폐기물처리시설, 공원, 학교, 주차장에 수용력개념을 적용, 주거지역의 제도개선방안 제시

표 2. 수용력 개념의 발전

개념	내용
생산 한계치	일정한 면적에서 생산가능한 자원의 양은 제한되어 있음
최대 개체수	수용력의 범위 내에서 유지될 수 있는 개체수로 표현됨 각 개체에 따라 이용정도는 각기 다름(인류는 이용정도가 가장 큰 종속종 하나임)
환경 부하	수용력의 초과는 환경에의 부하를 가져오고 그 영향이 다시 부메랑처럼 돌아오게 된다는 개념
지속 가능한 개발	환경에의 부하는 지속가능성을 저해하는 요인이 되고, 따라서 수용력의 범위 내에 개발을 하여야 한다는 적극적인 적용

출처 : 상하수도 시설의 도시 환경적 수용력 측정(이호철, 2002)

기서 토지능력은 토지의 생물적 생산력(biotic potential: B)과 환경이 인간과 토지의 생물적 잠재력에 가하고 있는 환경저항(environmental resistance: E)과의 곱($C = B \times E$)으로 나타낼 수 있다(이호철, 2002). 이는 토지이용과 토지의 생물적 생산력 또는 환경저항간의 관계는 서로 음(-)의 관계이기 때문에 환경의 저하나 미래 수용능력 감소 없이 특정 시·공간에서 부양가능한 생물종의 양에는 한계가 발생한다는 개념이다.

둘째, 수용력을 환경에의 부하로 보는 개념이다. Catton & William(1987)은 수용력을 환경이 영속적으로 지탱할 수 있는 최대 부하로 정의하(aus서 수용력과 부하의 개념을 설명하였다4).

4) 부하는 자원의 사용자수와 1인당 평균 사용량에 의해 결정되며, 따라서 부하는 서로 다른 형태를 가질 수 있으며, 수용력과 양립할 수 있다(Catton, 1987).

셋째, 환경이 지니는 수용력 범위 내에서 개발을 해야 한다는 환경용량 개념이 1992년 브룬틀란트 회의 이후 사용되었다. 이는 수용력을 초과하지 않는 수준에서 개발을 하여야만 지속가능성을 달성할 수 있다는 개념이다. 즉, 환경적으로 허용할 수 있는 개발의 정도는 정해져 있으며, 허용가능한 수준을 초과한 개발로 인한 환경문제는 지속가능성을 해치게 되기 때문에 그 범위 내에서 개발을 할 수 있도록 유도해야 한다는 것이다.

2.1.2 적용분야에 따른 개념

수용력에 대한 개념은 생태학, 관광학, 인구학, 환경계획, 도시계획 등 적용분야에 따라 다양하게 정의되고 있다. 표 3에서 나타난 공통적인 개념은 수용력을 넘어서는 인간활동으로 환경이 허용가능한 수준을 넘어서면 인간에게 해가 되는 현상이 따른다는 것이다. 따라서 수용력 한도 내에서 인간활동의 정도를 조절해야 될 필요가 있는데, 환경계획과 도시계획 분야처럼 인류의 생활과 관련된 분야에서는 그 한도를 ‘일정한 삶의 질을 지속적으로 유지할 수 있는 수준’이라는 다소 주관적인 입장에서 정의하고 있다. 여기서 ‘수준’은 환경에 어느정도 영향을 미칠 것인가를 충분히 고려한 사회적 함의를 기반으로 형성되어야 한다고 제기하고 있다.

환경계획분야는 수용력의 개념을 높은 차원으로 끌어올린 분야이다. Godschalk & Parker(1975)는 수용력이란 ‘자연 및 인공환경체계가 다양한 이용 요구를 부양할 수 있는 능력을 의미하며 불안정, 퇴화 및 불가능한 손상을 발생함이 없이 그 체계가 외부의 변화를 흡수할 수 있는 고유최대한계(inherent

표 3. 적용분야에 따른 수용력 개념

분야	수용력의 개념	비고
생태학	• 주어진 조건 하에서 생물종을 유지할 수 있는 최대 밀도	Odum, 2000
관광학	• 레크레이션의 질을 유지할 수 있는 이용수준 • 허용한계를 넘는 물리적 변화나 방문자 경험의 저하없이 어느 장소를 이용할 수 있는 최대 이용객 수	Wager Mathieson Wall, 1982
인구학	• 경제성장, 인류의 물질적 생활 수준은 궁극적으로 대자연이라는 한계에 의해 결정	Melthus, 1789
환경계획	• 인간활동이 환경기능에 바람직하지 않은 변화를 일으키거나 인간에게 가치있는 일의 손실 또는 환경질의 저하가 발생할 때의 자연환경이 갖는 한계 • 자연 및 인공환경체계가 다양한 이용 요구를 부양할 수 있는 능력을 의미하며 불안정, 퇴화 및 회복불가능한 손상을 발생함이 없이 그 체계가 외부의 변화를 흡수할 수 있는 고유최대한계(ingerent limit)	Chung, 1988 Godschalk &Paker, 1975
도시계획	• 수요가 가용자원의 공급능력을 초월하여 이에 따른 개발을 하게 될 때, 환경에 압력을 가하게 되는 수준 • 일정한 삶의 질을 지속적으로 유지할 수 있는 수준에서의 지역이 지탱할 수 있는 인간활동의 수준	McHarg, 1968 Godschalk &Axler, 1977 Bishop, 1974

출처 : 상·하수도 시설의 도시 환경적 수용력 측정(이호철, 2002).

표 4. 다양한 수용력 유형

연구자	수용력 유형
Godschalk & Parker (1975)	• 환경적 수용력(environmental carrying capacity) : 인간 활동이 환경에 바람직하지 못한 변화를 가져올 한계를 말함 • 지각적 수용력(perceptual carrying capacity) : 인간이 환경을 전과 다르다고 지각하기 전에 발생할 수 있는 활동의 양이나 변화의 정도를 말함 • 제도적 수용력(institutional carrying capacity) : 공공의 목표를 지향하는 개발을 지도, 수행할 수 있는 조직의 능력을 의미함
Godschalk and Axler(1977)	• 지역 성장관리를 목적으로 수용력을 환경용량(environmental capacity), 제도/서비스 용량(institutional/service capacity), 경제용량(economic capacity), 지각/행태 용량(perceptual/behavioral capacity)의 네 가지 차원으로 구분
Chung (1988)	• 지역환경계획을 위한 개념적 모형으로 수용력 유형을 공간용량(spatial capacity), 환경의 정화용량(environmental assimilative capacity), 기반시설용량(infrastructural capacity), 지각용량(perceptual capacity), 제도용량(institutional capacity)으로 구분
Daily & Enrlich (1992)	• 생물물리학적 수용력(biophysical carrying capacity): 주어진 기술수준하에서 생물물리학적으로 유지될 수 있는 최대 인구규모를 의미함 • 사회적 수용력(social carrying capacity): 다양한 사회체계(특히, 관련된 자원 소비 패턴)하에서 유지될 수 있는 최대 인구규모를 의미함
김선희 (1999)	• 환경용량의 적용 및 분석에 있어서 용량의 형태는 환경, 제도/서비스, 경제, 인식적 요소로 분류되며, 지역개발 및 계획에서 주로 적용하는 용량의 형태는 토지이용의 적성도, 적정 인구규모, 공공서비스시설 수급의 적정성 등의 형태로 표현되고 있음

출처 : 지속가능한 도시환경을 달성하기 위한 통합적 도시 수용력 평가체계 수립(오규식, 정연우, 이동근, 이왕기, 2002).

limit)’로 정의하고 있다. 한편 도시계획분야에서도 수용력 개념이 다양하게 적용되었는바, McHarg(1968)는 토지가 가지고 있는 능력에 따라 용도가 결정되어야 최대의 효율을 달성할 수 있다고 주장했다. 분석방법으로는 토지적합성 분석방법인 도면 중첩방법을 제안하였고, 인간이 활동하는 토지들은 특성에 따라 다른곳에 위치하고, 이 때 토지가 가지게 되는 능력이 수용력이라는 것을 주장하였다.

2.2 수용력의 유형

수용력은 크게 환경/생태적 수용력, 시설/서비스 수용력, 지각적 수용력, 행·재정적 여건의 4가지 유형으로 구분할 수 있다(오규식 외, 2002). 이 중 환경적 수용력은 일정한 삶의 질을 지속적으로 영위하는데 있어 도시환경과 생태계가 회복불가능한 저하나 손상없이 지탱할 수 있는 인간의 활동을 의미한다. 이러한 개념은 자연환경 및 생태계의 훼손 정도가 그를 원상태로 복구함에 있어서 과도한 비용을 수반하거나 혹은 그

훼손에 의해 회복이 전혀 불가능한 상태로 이르게 되는 한계치가 존재한다는 가정으로부터 출발한다(Kozlowski, 1990).

본 연구의 대기환경기준 하에서의 대기오염물질 배출량 추정과 이를 기반으로한 지탱가능한 인구수 산정은 수용력 유형 중 Godschalk & Parker(1975)가 언급한 환경적 수용력에 속한다고 할 수 있다.

3. 대기오염 및 대기환경정책

3.1 대기오염의 정의 및 대기오염물질

3.1.1 대기오염의 정의

대기오염의 정의는 국가, 단체 혹은 학자에 따라 약간의 차이가 있다. 사전적 의미의 대기오염이란 ‘인위적 발생원에서 배출된 물질이 생물이나 건축물 및 기타 인간생활에 필요한 여러 물건들에 직접적으로 해를 끼칠 만큼 다량으로 공기

표 5. 대기오염물질의 종류

구분	대기오염물질
가스상 물질	황산화물: SO, SO ₂ , H ₂ SO ₄ 등
	질소화합물: NO, NO ₂ , NSO 등
	산소화합물: CO, O ₃ 등
	할로겐화합물: HF, HCL, F ₂ , CL ₂
	유기화합물: Methane, Butane, Aldehyde
입자상 물질	부유분진
	강하매진

표 6. 세계 주요국가의 대기환경기준의 비교

항목	기준	한국	미국	일본	EU
CO (ppm)	1시간	25	35		
	8시간	9	9	20	8.6
	24시간			10	
NO ₂ (ppm)	1시간	0.15			0.105
	24시간	0.08		0.04~0.06	
	연간	0.05	0.053		0.021
SO ₂ (ppm)	1시간	0.15		0.10	0.13
	24시간	0.05	0.14	0.04	0.047
	년	0.02	0.03		
PM ₁₀ (μg/m ³)	1시간			200	
	24시간	150	150	100	50
	연간	70			20

출처 : 대기환경연보(환경부, 2004).

중에 존재하는 상태'를 말한다. 구체적으로 보면, 공기 중에 인위적 혹은 자연적으로 방출된 오염물질로 인하여 공기의 성분과 상태가 변화하고, 그 질이 악화되어 인간과 동식물의 활동에 영향을 줄 때 공기가 오염되었다고 한다(우완기 외, 2007). 한편 세계보건기구(WHO)에서는 “대기오염이란 인공적으로 배출되어 대기 중에 있는 오염물의 양, 농도 및 지속 시간의 과잉으로 특정지역의 다수인에게 불쾌감을 주는 상태, 혹은 공중위생상 인간, 동·식물 및 재산에 유해하고 쾌적한 생활을 방해하는 상태”라 정의하고 있다.

이를 바탕으로 대기오염을 정의하면 “대기오염이란 인위적, 혹은 자연적으로 배출된 오염물질이 사람들에게 불쾌감 및 공중보건상의 위해를 끼쳐 쾌적한 생활과 재산을 지키고 누릴 권리를 위협하는 실내·외 대기상태”라 할 수 있다.

3.1.2 대기오염물질의 종류

대기오염물질은 물리적인 형상에 의해 크게 가스상 물질과 입자상 물질로 구분된다(윤오섭, 1999). 가스상 오염물질은 물질의 연소·합성·분해시 발생하거나 물리적 성질에 의해 발생하는 기체상 물질로, 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x), 산소산화물, 할로겐화합물, 유기화합물 등이 해당한다

(대기환경연구회, 2001). 한편 입자상 오염물질은 물질의 파쇄·선별·퇴적·이적 기타 기계적 처리 또는 연소·합성·분해시 발생하는 고체상 또는 액체상의 미세한 물질을 말한다. 입자상 오염물질은 연무(mist), 먼지(dust), 연기(smoke), 혼연(fume), 안개(fog), 박무(haze), 스모그(smog)등과 같은 상태로 존재한다.

3.2 대기환경정책

3.2.1 규제정책

대기환경 관리를 위한 규제정책으로는 환경기준에 의한 사업장 연료규제정책, 청정연료 사용의무화 조치, 자동차배출가스 규제 등이 있다.

우리나라의 환경기준은 「환경정책기본법」 시행령에 대기, 소음, 수질의 3개 분야에 대해 설정되어 있으며, 대기분야에서는 아황산가스(SO₂), 이산화질소(NO₂), 일산화탄소(CO), 오존(O₃), 미세먼지(PM₁₀), 납(Pb)의 6개 물질에 대해 환경기준이 설정되어 있다.

사업장 대기오염물질 규제방안은 크게 예방차원의 연료규제정책과 사후차원의 매연탈황시설 설치로 구분할 수 있으며, 우리나라에서는 예방차원의 연료규제정책이 주를 이루고 있다(한국환경정책평가연구원, 1997).

또한 1988년부터 아황산가스(SO₂)를 포함한 다른 대기오염물질의 배출량을 원천적으로 감축하기 위하여 환경기준을 초과하거나 초과할 우려가 있는 지역 내의 일정규모 이상의 보일러를 사용하는 빌딩이나 아파트의 중앙난방시설 및 발전시설의 경우 LNG 등 청정연료 사용을 의무화하게 되었다(유상희, 1998).

한편, 우리나라의 자동차배출가스 규제는 크게 휘발유와 경유사용 차량에 대한 제작차 및 운행차 관리로 구분되어지며, 최근에는 운전자에 대한 교육과 홍보를 강화하여 환경운전을 생활화하도록 추진하고 있다(윤오섭, 1999).

3.2.2 경제적 유인제도

경제적 유인제도란 직접규제 방식과는 달리 오염물질 배출량을 시장 메커니즘 또는 규제당국이 설정한 가격에 의해 적정수준으로 유지하려는 방식이다. 이 방식은 오염자의 자율적이고 신축적인 대응을 유도할 수 있다는 특성으로 인해 직접규제에 비해 효율적이라고 할 수 있다(정희성·변병설, 2003). 경제적 유인제도에는 다양한 방법이 있으나 크게 배출 부과금, 예치금, 배출권거래제도 등으로 구분하여 살펴볼 수 있다.

첫째, 부과금 제도는 오염물질 배출자에 대하여 오염물질을 스스로 처리하거나, 그 처리비용에 해당하는 부과금을 납부하게 하는 제도로 배출총량, 초과농도, 배출지역 등에 따라

차등 부과된다(박균성, 2004). 이 제도는 대부분의 OECD 국가에서 사용되고 있으며, 우리나라에서는 1986년 제4차 법 개정 시 배출허용기준을 초과하여 오염물질을 배출하면서 조업을 하는 경우에 대하여 배출부과금을 부과하도록 하였다.

둘째, 예치금 제도는 오염원 발생에 대한 책임을 오염원인자에게 예치금이라는 형태로 부과징수하였다가 발생된 오염물질이 적절히 처리되어 사회가 부담해야 할 환경비용을 감소시켰을 경우에 적립된 예치금을 반환하는 제도이다(정희성·변병설, 2003). 현재 우리나라에서는 폐기물 예치금 제도가 운영되고 있으며, 공사장 비산먼지 감소를 위해 예치금 제도에 관한 논의가 활발히 일어나고 있다.

셋째, 배출권거래제도는 오염문제의 근본적 원인이 환경에 대한 재산권의 부재 혹은 불완전성에 있다는 인식하에 환경에 대한 재산적 권리를 설정하고, 경제 주체 간에 배분하여 거래도록 함으로서 효율적인 의사결정을 촉진하고자 하는 정책수단이다(정희성, 1995). 미국 환경청(EPA)은 대기오염관리를 위해 1970년대 중반부터 배출권거래제도(The Emission Trading Program)를 개발하여 1986년에 확정된 정책을 발표하였다. 배출권 거래제도의 대상을 탄화수소(HC), 질소산화물(NOx), 먼지(TSP), 황산화물(SOx), 일산화탄소(CO) 등 다섯 가지로 한정하였으며, 1990년 개정된 대기정화법(Clean Air Act)을 통해 지역별 전력회사의 배출량 감축을 시도하였다. 우리나라에서는 「수도권대기환경개선에관한특별법」 제18조에서 대기오염매매를 통한 배출허용총량을 허가하고 있다.

4. 사례연구

4.1 분석방법

본 연구에서의 대기오염을 고려한 환경적 수용력 산정과정은 그림 1과 같다.

첫 번째 단계는 대기오염물질 배출량과 농도와의 관계 분석을 위한 자료구축 단계로, 국립환경과학원에서 제공되는 격자별(1km×1km) 대기오염물질 배출량 자료의 공간적 단위에 맞게 대기오염농도를 추정한다. 이를 위해 우선 대기오염 측정소와 지자체에서 측정한 점(point) 형태의 농도를 보간법(Interpolation)을 적용하여 전체 대상지로 확장하고⁵⁾, 이를

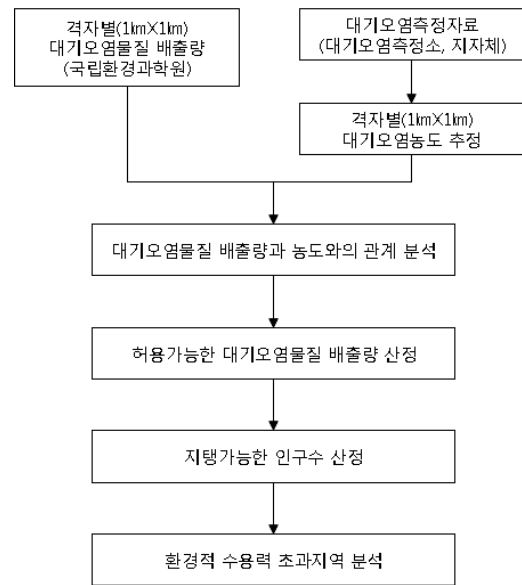


그림 1. 환경적 수용력 산정과정

바탕으로 1km×1km 격자에 맞게 평균치로 변환한다.

두 번째 단계는 대기오염물질 배출량과 농도와의 관계를 분석하는 단계로, 우선 앞서 추정한 격자별 농도와 대기오염물질 배출량(면 오염원, 이동오염원, 총오염원)간 상관관계를 분석하고, 이 중 상관성이 높게 나타난 경우에 대해 농도와 대기오염물질 배출량간 회귀분석을 수행한다. 본 연구에서는 대기오염물질 배출량(Q)과 농도(C)와의 관계를 파악하기 위해 단순한 형태의 대기확산모형인 박스모형(Seinfeld and Pandis, 1998)을 이용한다⁶⁾.

$$C = \alpha \times Q + \beta \tag{1}$$

C : 대기오염농도(ppm)

Q : 대기오염물질 배출량(kg)

α, β : 계수

세 번째 단계는 회귀분석 결과를 적용하여 대기환경기준(대기오염농도) 하에서 대기오염물질 배출량을 산정하는 단계이다. 이를 위해 최소한의 대기환경수준(C)을 정하고, 박스모형을 통해 도출된 식 (1)을 적용하여 인간활동으로 인한 허용가능한 대기오염물질 배출량(Q)을 산정한다.

5) 대기오염농도 분포도를 작성하기 위해서는 측정되지 않은 지점의 농도를 추정해야 하며, 환경분야에서는 IDW 보간법과 Kriging 보간법이 많이 사용된다. IDW 보간법은 실측값과의 거리에 가중을 주어 보간하는 방법으로 거리가 가까울수록 더 높은 가중값이 적용되는 보간법이다. 실측값으로부터 멀어질수록 예측하고자 하는 지점과의 연관성이 줄어들고 가까울수록 연관성이 커지는 특성을 이용한다. Kriging 보간법은 IDW와 마찬가지로 가중치의 적용에 의해 예측하고자 하는 지점의 값을 추정하는 방법이지만 IDW와 같이 단순거리에 관한 함수를 이용하기 보다는 측정된 알려진 값들 간의 공간적 구조와 공간상관에 근거하는 방법이다. 이 방법은 주위의 실

측값들을 선형으로 조합하여 주변의 측정값들을 통계적으로 분석하여 사용하는 방법이다. 본 연구에서는 넓게 퍼져나가는 Kriging 기법보다는 근접측정망의 영향을 받는 IDW 보간법을 사용하여 농도 분포를 추정하였다.

6) 박스모형은 대류현상이 활발하여 공간내 오염물질이 고르게 분포되어 있다는 가정 하에 CSTR(Continuous Stirred Tank Reactor) 개념을 도입한 모형으로, 이를 통해 대기오염물질 배출량과 농도와의 관계를 나타내는 매개변수의 추정이 가능하다.

네 번째 단계는 앞서 산정된 대기오염물질 배출량을 기반으로 대상지가 지탱할 수 있는 인구규모를 산정하는 단계이다. 본 연구에서는 현재의 배출량(E_p)과 인구수(P)와의 관계를 적용하여 허용가능한 배출량 하에서 지탱가능한 인구수(P_e)를 산정한다.

$$P_e = \frac{Q}{E_p} \times P \quad (2)$$

P_e : 지탱가능한 인구수(인)

Q : 대기환경 기준하에서의 허용배출량(kg)

E_p : 현재대기오염물질 배출량(kg)

P : 현재 인구수(인)

마지막 단계는 도시의 환경적 수용력을 초과한 지역을 도출하는 단계로, 앞서 산정한 격자별 지탱가능한 인구수가 실제 인구수 보다 작게 나타난 지역을 찾아낸다.

4.2 환경적 수용력 산정

4.2.1 사례대상지 및 분석대상

본 연구는 「환경정책기본법」에서 관리하고 있는 주요물질 중 가스상 오염물질인 일산화탄소(CO), 이산화질소(NO_2), 아황산가스(SO_2)를 분석대상으로 한다. 미세먼지(PM10)의 경우 황사나 미세한 분진에도 발생하는 불안정한 특성이 있기 때문에 제외하였다. 사례대상지는 경기도 과천시를 선정하였으며, 분석을 위해 건축물의 위치, 대기오염농도 측정점, 대기오염물질 배출량 데이터를 표시할 수 있는 수치지형도를 이용하였다.

4.2.2 대기오염물질 배출량

대기오염물질 배출량 자료는 환경부 산하 국립환경과학원에서 제공하는 배출량 자료를 사용하였다. 자료에는 TM좌표가 입력되어 있으며, 이를 바탕으로 1km×1km 범위의 격자에 대기오염물질 배출량(면오염원, 이동오염원, 총오염원)을 할당하였다. 총배출량은 면오염원과 이동오염원 배출량의 합으로 나타냈다.

일산화탄소(CO)와 이산화질소(NO_2), 아황산가스(SO_2)의 총배출량을 살펴본 결과, 공통적으로 과천시와 서울시 경계인 북동부 및 주거지와 상업시설이 밀집해 있고 차량통행이 많은 도심부에서 많이 배출되는 것으로 나타났다.

4.2.3 대기오염농도 추정

대기오염측정소와 과천시에서 측정한 데이터를 기반으로 IDW 보간법을 적용하여 격자별 대기오염물질 농도를 추정하였다⁷⁾.

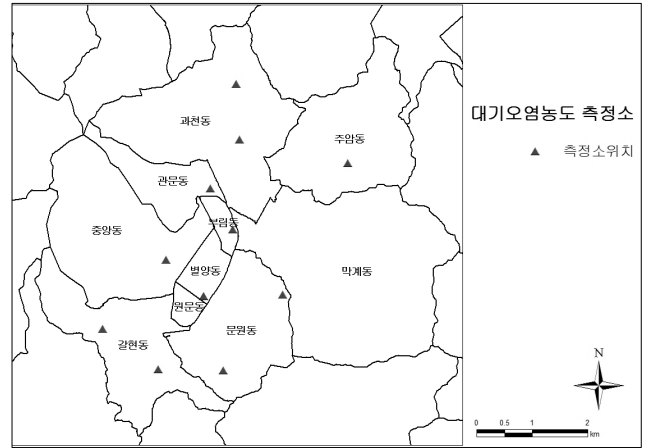


그림 2. 대기오염농도 측정위치

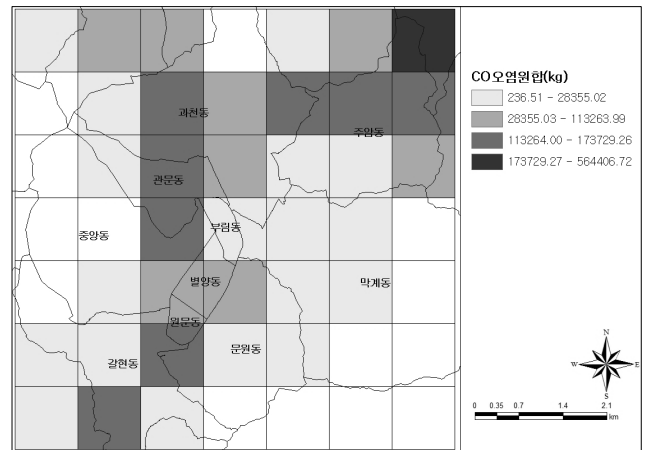


그림 3. 일산화탄소(CO) 총배출량 분포

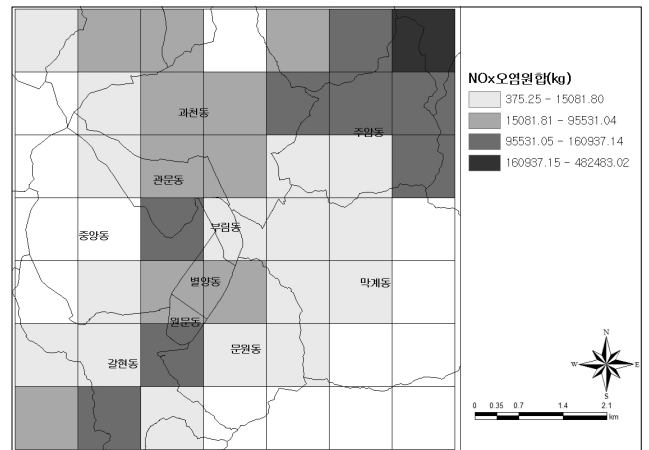


그림 4. 이산화질소(NO_2) 총배출량 분포

7) 과천시 2개소(과천동, 별양동)에 위치한 대기오염측정소에서 측정된 (2003년 6월 18일~6월 22일, 9월 2일~9월 6일, 11월 13일~11월 18일, 2004년 1월 14일~17일) 대기자료를 사용하였다. 또한 과천시 자원정화센터에서 조사된 10개소의 동일한 시간의 대기자료를 사용하였다.

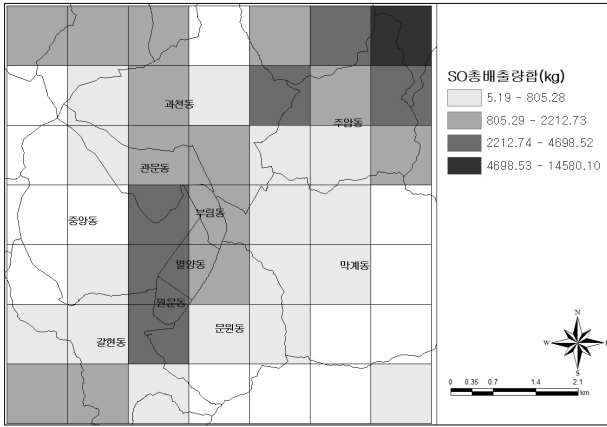


그림 5. 아황산가스(SO₂) 총배출량 분포

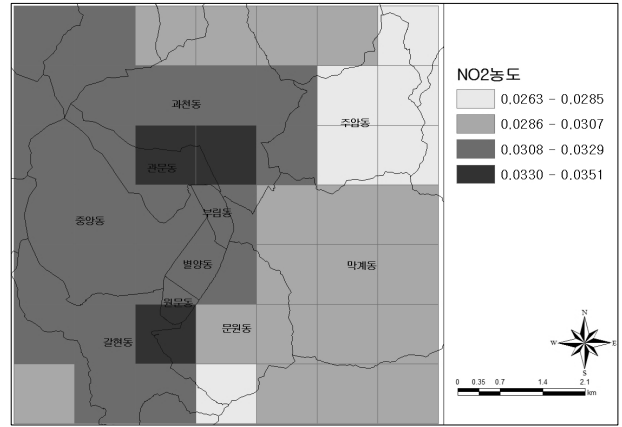


그림 7. 이산화질소(NO₂) 농도

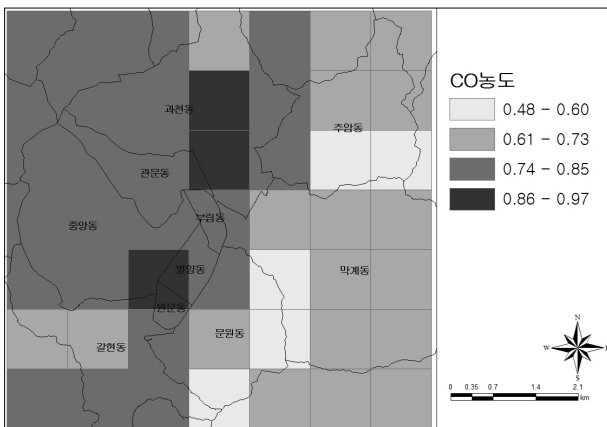


그림 6. 일산화탄소(CO) 농도

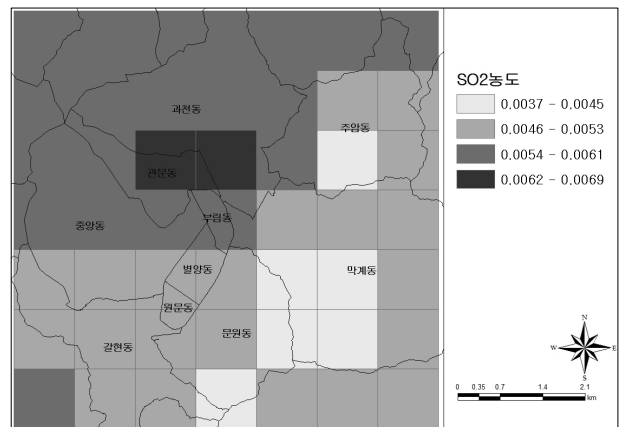


그림 8. 아황산가스(SO₂) 농도

일산화탄소(CO)의 경우 과천시 중심부를 기준으로 북서쪽의 농도가 높게 나타났으며, 이산화질소(NO₂)는 과천시 중심부를 기준으로 서쪽의 농도가 높게 나타났다. 한편 아황산가스(SO₂) 농도는 과천시 중심부에서 북쪽이 높게 나타났다.

4.2.4 배출량과 농도와의 관계분석

우선 앞서 구축한 격자별 대기오염물질 배출량(면 오염원, 이동오염원, 총오염원)과 농도간의 상관관계를 분석하였다. 일산화탄소(CO)와 이산화질소(NO₂) 농도는 이동오염원 배출량 및 총배출량과 유의한 관계를 보이며, 아황산가스(SO₂) 농도는 이동오염원에 의한 배출량과 유의한 관계를 보이고 있다.

다음으로 상관분석을 통해 상관성이 높게 나타난 경우에 대해 박스모형을 적용하여 대기오염농도와 대기오염물질 배출원 사이의 회귀분석을 각각 수행하였다⁸⁾.

표 7. 배출량과 농도간의 상관분석 결과

농도	배출량	상관계수
일산화탄소	이동오염원	.622*
	총오염원	.620*
이산화질소	이동오염원	.605*
	총오염원	.559*
아황산가스	이동오염원	.578*

주 : * 상관계수는 0.05 수준(양쪽)에서 유의
 ** 상관계수는 0.01 수준(양쪽)에서 유의

표 8. 회귀분석 결과

농도	변수	t	계수	상수	R제곱
일산화탄소	이동오염원	2.861	1.209E-06	.700	.386
	총오염원	2.846	1.168E-06	.699	.384
이산화질소	이동오염원	2.737	1.975E-08	.031	.366
	총오염원	2.430	1.608E-08	.031	.312
아황산가스	이동오염원	2.551	9.157E-07	.005	.334

8) 국립환경과학원에서 제공하는 배출량(1km×1km 단위) 자료와 본 연구에서 추정된 대기오염물질 농도(12개 측정소)의 공간적 분포 밀도가 상이하여 회귀분석의 설명력(R제곱)이 다소 낮게 나타났다.

4.2.5 허용가능한 배출량 산정

앞서의 회귀분석 결과 도출된 회귀식을 적용하여 대기환

표 9. 허용가능배출량(국가 기준)

구분		대기환경기준	허용가능배출량
CO 농도	이동오염원	10ppm	8,213톤
	총오염원	10ppm	7,963톤
NO ₂ 농도	이동오염원	0.05ppm	962톤
	총오염원	0.05ppm	1,181톤
SO ₂ 농도	이동오염원	0.02ppm	16톤

표 10. 허용가능배출량(경기도 기준)

구분		대기환경기준	허용가능배출량
CO 농도	이동오염원	10ppm	8,213톤
	총오염원	10ppm	7,963톤
NO ₂ 농도	이동오염원	0.04ppm	455톤
	총오염원	0.04ppm	559톤
SO ₂ 농도	이동오염원	0.014ppm	9톤

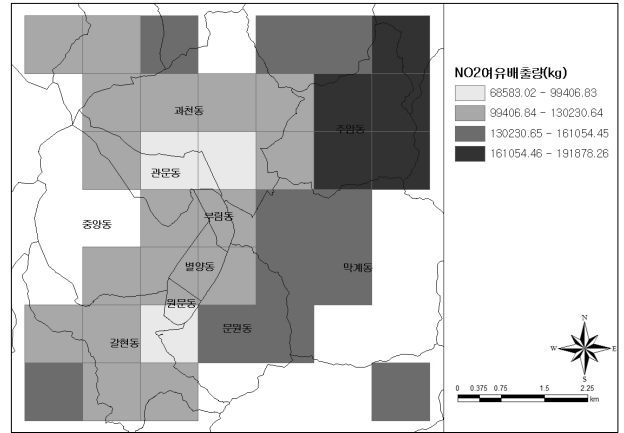


그림 11. NO₂ 총오염원의 여유배출량(경기도 대기환경기준)

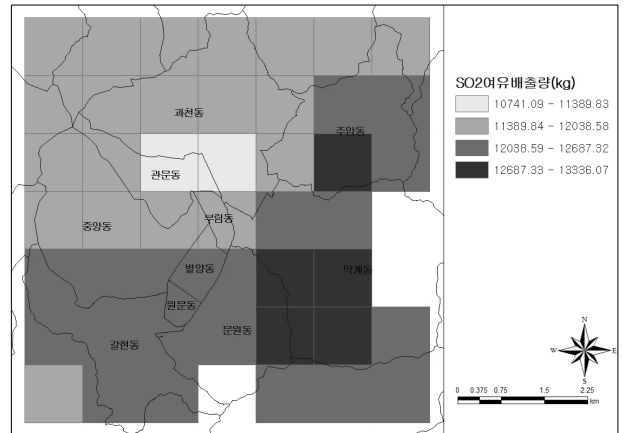


그림 12. SO₂ 이동오염원의 여유배출량(국가 대기환경기준)

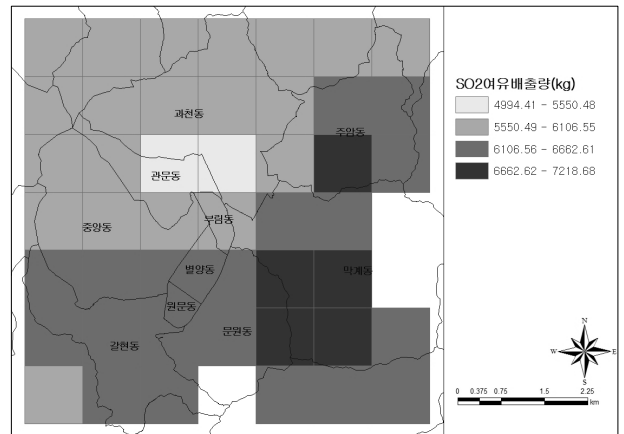


그림 13. SO₂ 이동오염원의 여유배출량(경기도 대기환경기준)

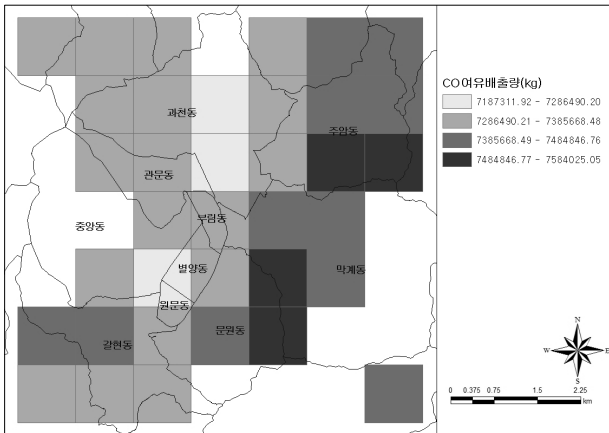


그림 9. CO 총오염원의 여유배출량

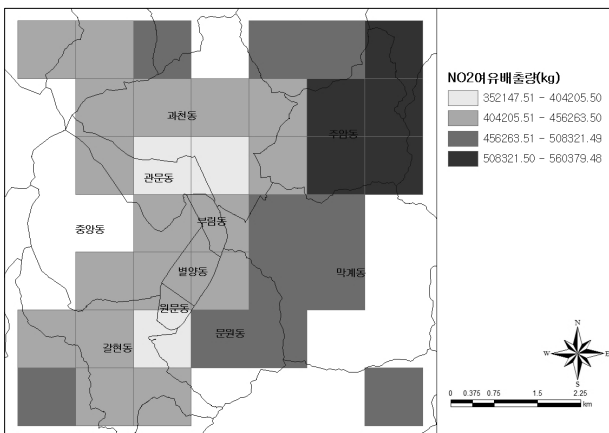


그림 10. NO₂ 총오염원의 여유배출량(국가 대기환경기준)

경기준(대기오염농도) 하에서 허용가능한 배출량을 산정하였다. 본 연구에서는 최소한의 대기환경수준으로 자료구축 시점인 2003년도의 국가 및 경기도 대기환경기준(연간)을 각

각 적용하였다.)

분석결과, 경기도 대기환경기준이 국가 기준보다 엄격하기 때문에 허용가능한 배출량이 국가 기준 보다 더 적게 나타났다. 구

9) 일산화탄소(CO)의 연간 평균치 기준은 국내기준이 없어 일본의 대기환경기준(10ppm/년)을 준용하였다.

체적으로 경기도 대기환경기준 하에서, 일산화탄소(CO)의 경우 총오염원 기준으로 허용가능배출량이 약 8천톤으로 산정되었으며, 이산화질소(NO₂)는 총오염원 기준으로 허용가능배출량이 약 560톤 가량 산정되었다. 한편 아황산가스(SO₂)는 이동오염원 기준으로 허용가능배출량이 9톤으로 가장 적게 나타났다.

다음으로 허용가능배출량에서 현재의 배출량을 감하여 격자별 여유배출량을 도출하였다. 여유배출량의 공간적 분포는 국가 기준과 경기도 기준에서 유사하게 나타났다.

일반적으로 대기오염물질이 많이 발생하는 교통량이 많은 지역에서 여유배출량이 상대적으로 적게 나타났다. 일산화탄소(CO)와 이산화질소(NO₂)의 경우 청계산이 위치한 과천시 동쪽부분에서 여유배출량이 많게 나타났다. 반면 아황산가스(SO₂)의 여유배출량은 과천시 남쪽부분에서 많게 나타났다.

4.2.6 지탱가능한 인구수 산정

앞서 산정한 대기환경기준 하에서 허용가능한 배출량을 바탕으로 식 (2)를 적용하여 대상지가 지탱할 수 있는 인구규모를 산정하였다. 분석결과, 허용가능배출량과 마찬가지로 경기도 대기환경기준이 국가 기준보다 엄격하기 때문에 지탱가능 인구수가 국가 기준보다 더 적게 나타났다. 구체적으로 경기도 대기환경기준 하에서, 일산화탄소(CO)의 경우 총오염원 기준으로 지탱가능인구수는 2003년 기준 과천시 인구 70,324명의 절반 정도 수준인 약 3만 6천명으로 산정되었다. 한편 이산화질소(NO₂)는 총오염원 기준으로 지탱가능한 인구수가 약 2천 8백명으로 가장 적게 산정되었고, 아황산가스(SO₂)는 이동오염원 기준으로 지탱가능인구수가 4천 8백명으로 산정되었다.

표 11. 지탱가능인구수 산정(국가 기준)

구분		대기환경기준	지탱가능인구수
CO 농도	이동오염원	10ppm	45,705명
	총오염원	10ppm	36,482명
NO ₂ 농도	이동오염원	0.05ppm	6,368명
	총오염원	0.05ppm	5,904명
SO ₂ 농도	이동오염원	0.02ppm	8,074명

표 12. 지탱가능인구수 산정(경기도 기준)

구분		대기환경기준	지탱가능인구수
CO 농도	이동오염원	10ppm	45,705명
	총오염원	10ppm	36,482명
NO ₂ 농도	이동오염원	0.04ppm	3,016명
	총오염원	0.04ppm	2,796명
SO ₂ 농도	이동오염원	0.014ppm	4,844명

4.2.7 환경적 수용력 초과지역 분석

지탱가능한 인구규모를 초과한 지역을 도출하기 위해, 우선 대상지내 동별 인구수를 격자별로 할당하였다. 인구자료는 2003년 과천시 통계연보의 행정동별 인구수를 사용하였으며, 격자와 중첩되는 해당 행정동의 면적 비율을 적용하여

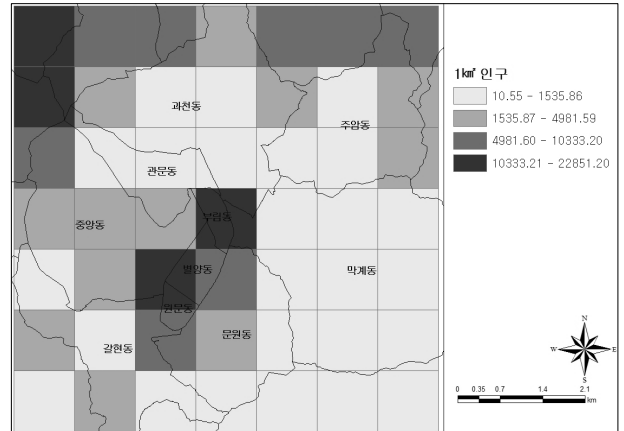


그림 14. 1kmX1km 지역내 인구수

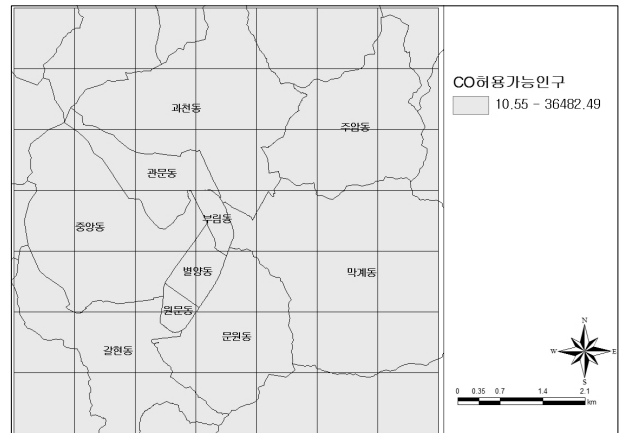


그림 15. CO의 총오염원 기준 지탱가능인구수 초과지역

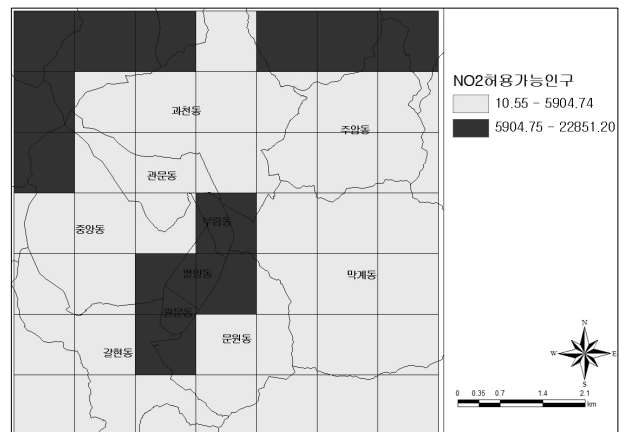


그림 16. NO₂의 총오염원 기준 지탱가능인구수 초과지역(국가 대기환경기준)

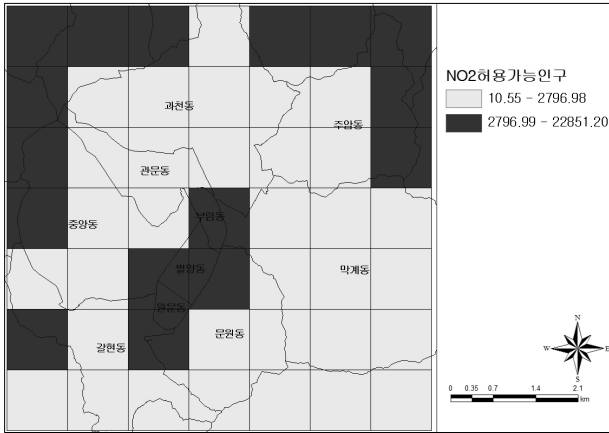


그림 17. NO₂의 총오염원 기준 지탱가능인구수 초과지역(경기도 대기환경기준)

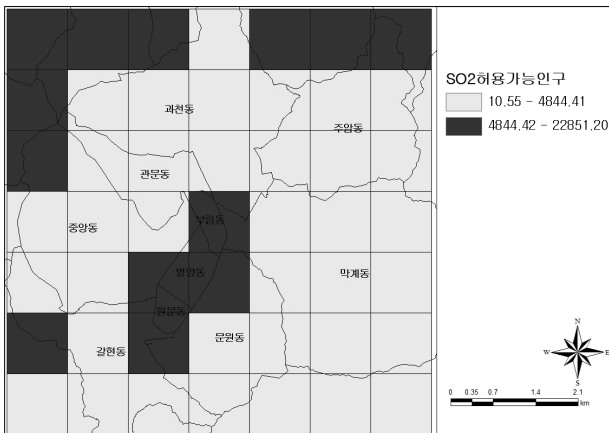


그림 18. SO₂의 이동오염원 기준 지탱가능인구수 초과지역(국가 대기환경기준)

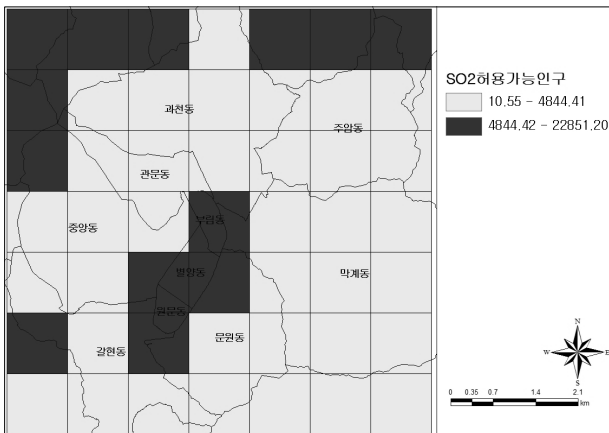


그림 19. SO₂의 이동오염원 기준 지탱가능인구수 초과지역(경기도 대기환경기준)

격자별 인구수를 산출하였다. 과천시의 경우 별양동과 부림동을 중심으로 인구분포가 높게 나타나고 있다.

앞서 산정한 지탱가능한 인구수에서 격자별 실제 인구수를 감하여 과천시의 환경적 수용력을 초과한 지역을 도출하였다. 일산화탄소(CO)의 경우를 제외하고 이산화질소(NO₂)

와 아황산가스(SO₂)의 경우에는 수용력을 초과한 지역이 나타났다.

구체적으로 경기도 대기환경기준 하에서, 이산화질소(NO₂)의 경우 총오염원 기준으로 지탱가능한 인구수를 초과한 지역이 16개 지역으로 나타났다. 공간적 분포를 보면, 주거지와 상업시설이 밀집되어 있는 부림동, 별양동, 원문동, 중앙동 일부지역과 서울시와 경계부분이 수용력을 초과한 것으로 나타났다. 한편 아황산가스(SO₂)는 이동오염원 기준으로 지탱가능인구수를 초과한 지역이 13곳으로 이산화질소(NO₂)와 유사한 분포를 보인다.

이상의 대기환경기준 하에서 도출한 수용력을 바탕으로 도시 관리방안을 고려해본다면, 여유배출량이 낮거나 지탱가능한 인구수를 초과한 지역은 우선적으로 개발에서 배제해야 할 것이다. 즉, 대상지의 지속가능한 개발을 위해서는 본 연구에서 산정한 허용가능한 배출량 또는 지탱가능한 인구의 범위 내에서 도시의 성장을 관리해야 할 것이다.

5. 결론

본 연구는 과천시를 대상으로 대기오염농도와 배출량간의 관계 분석, 대기환경기준 하에서의 지탱가능한 인구수 산정을 통해 다음과 같은 결과를 도출하였다.

첫째, 수도권에 위치한 과천시를 사례대상지로 선정하였으며, 대기오염측정소와 과천시에서 측정한 데이터를 기반으로 IDW 보간법을 이용하여 대기오염농도를 추정하였다. 과천시 중심부를 기준으로 일산화탄소(CO)는 북서쪽, 이산화질소(NO₂)는 서쪽, 그리고 아황산가스(SO₂)는 북쪽이 농도가 높게 나타났다.

둘째, 격자별 대기오염물질 배출량과 농도간의 상관관계를 분석하였다. 일산화탄소(CO)와 이산화질소(NO₂) 농도는 이동오염원 배출량 및 총배출량과 유의한 관계를 보이며, 아황산가스(SO₂) 농도는 이동오염원에 의한 배출량과 유의한 관계를 보였다. 그리고 상관성이 높게 나타난 경우에 대해 박스모형을 적용하여 농도와 대기오염물질 배출원 사이의 회귀분석을 수행하였다.

셋째, 박스모형을 이용하여 대기환경기준 하에서 허용가능한 배출량을 산정하고, 이를 토대로 지탱가능한 인구수를 도출하였다. 경기도 대기환경기준 하에서, 일산화탄소(CO)의 경우 총오염원 기준으로 지탱가능인구수는 2003년 기준 과천시 인구의 절반 정도 수준인 약 3만 6천명으로 산정되었고, 이산화질소(NO₂)와 아황산가스(SO₂)는 5천명 이하로 매우 적게 나타났다.

넷째, 지탱가능한 인구수에서 실제 인구수를 감하여 과천시의 환경적 수용력을 초과한 지역을 도출하였다. 이산화질

소(NO₂)와 아황산가스(SO₂)의 경우 주거지와 상업시설이 밀집되어 있는 부림동, 별양동, 원문동, 중앙동 일부지역과 서울시와 경계부분이 수용력을 초과한 것으로 나타났다.

국내외적으로 대기환경을 고려한 수용력 평가에 관한 연구는 아직까지 미비한 실정이다. 이에 본 연구에서 제시한 평가체계는 도시환경을 고려한 구체적인 인구지표를 제시하는데 의의가 있으며, 이를 통해 지속가능한 도시 관리방안 수립에 일조할 수 있을 것이다. 예를 들어, 지탱가능한 인구수를 초과한 지역은 가급적 개발을 자제하고, 여유배출량이 많게 나타난 지역을 대상으로 그 범위내에서 지역특성을 고려하여 적정 수준의 개발을 유도해야 할 것이다.

한편, 본 연구는 기존의 도시기후 관련 연구들과 마찬가지로 대기오염농도 추정 모형의 한계, 격자단위의 농도 산정에 따른 오차발생, 측정지점의 비균질적 분포 등 한계를 지니고 있다. 이에 향후에는 대기오염농도 측정지점의 확충, 격자크기의 세밀화 등을 통한 보다 정확한 분석이 필요할 것이다.

참고문헌

- 경기개발연구원(2003), 「경기도지역 대기오염의 사회적 비용 추정 및 적정 수준 달성방안」.
- 고성석(2001), “건설안전정보시스템 구축에 관한 연구”, 「한국안전학회지」, 16(4): 140~146.
- 김선희(1999a), “환경용량평가의 동행과 과제(상)”, 「월간국토」, 9.
- 김선희(1999b), “환경용량평가의 동행과 과제(하)”, 「월간국토」, 10.
- 김운수(2001), “기후특성을 고려한 도시계획제도의 도입과 적용가능성에 관한 연구”, 「서울도시연구」, 2(1): 1~21.
- 대기환경연구회(2001), 「대기환경개론」, 도서출판 동화기술.
- 서울시정개발연구원(1999), 「서울시 환경용량 평가에 관한 연구」.
- 서울시정개발연구원(2000), 「서울시 환경용량 평가에 관한 연구 II」.
- 오성남(2000), “서울지역의 지형 및 토지이용도에 따른 3차원 바람장 산출에 관한 연구”, 「Journal of the Korean Meteorological Society」, 36(2): 229~244.
- 오규식(1996), “도시경관의 시각적 한계수용능력(VTCC)설정과 그 활용”, 「국토계획」, 31(2): 97~110.
- 오규식, 정연우, 이동근, 이왕기(2002), “지속가능한 도시환경을 달성하기 위한 통합적 도시 수용력 평가체계 수립”, 「국토계획」, 37(5): 7~26.
- 오규식, 구자훈, 조창제(2005), “도시형태 구성요소가 지역별 대기오염에 미치는 영향”, 「국토계획」, 40(3): 159~170.
- 우완기, 손종렬, 손부순(2007), 「대기오염개론」, 신광문화사.
- 윤오섭(1999), 「환경학」, 세진사.
- 이호철(2002), “상·하수도 시설의 도시 환경적 수용력 측정”, 한양대학교 대학원 석사학위논문.
- 정순오(1983), “환경계획이론으로서의 수용능력의 개념과 응용방법”, 「한국조경학회지」, 11(2): 193~210.
- 정연우(2004), 「수용력 개념에 기초한 도시의 개발가능밀도 평가: 환경 및 시설수용력 분석을 중심으로」, 한양대학교 대학원 박사학위논문.
- 정희성, 변병설(2003), 「환경정책의 이해」, 박영사.
- 정희성(1995), “오염허가증 거래제도와 활용방안 환경정책”, 「환경행정」, 3(1): 27~51.
- 최막중, 김진유(1999), “기반시설 제약조건하에서의 도시개발용량과 토지이용밀도”, 「국토계획」, 34(3): 61~72.
- 최영국(1999), “환경용량의 허와 실”, 「월간국토」, 4.
- 한국환경정책평가연구원(1997), 「외국의 대기오염관리 성공사례 및 정책적 시사점」.
- 한국환경정책평가연구원(2002), 「사업장 질소산화물 저감기술의 평가 및 비용분석」.
- 환경부(2006), 「환경백서」.
- 환경부(2004), 「대기환경연보 2003」.
- Catton, W.R., Jr. (1987), *The world's most polymorphic species: carrying capacity transgressed two ways*, *Bioscience*, 37: 413~419.
- Chung, S. (1988), “A conceptual model for regional environmental planning centered on carrying capacity measures”, *The Korean journal of Regional Science*, 4(2): 117~128.
- Godschalk, D.R. and N. Axler (1977), *Carrying capacity applications in growth management: a reconnaissance*, Washington, DC, Department of Housing and Urban Development.
- Godschalk, D.R. and F.H. Parker (1975), “Carrying capacity: a key to environmental planning?”, *Journal of Soil and Water Conservation*, 30(July-August): 160~165.
- Kozlowski, J.M. (1990), “Sustainable development in professional planning: a potential contribution of the EIA and UET concept”, *Landscape and Urban Planning*, 19: 307~332.
- Lin (2002), *The application of GIS to air quality analysis in Taichung City*, *Environmental Modeling & Software*, 17: 11~19.
- Onishi, T. (1994), “A capacity approach for sustainable urban development: an empirical study”, *Journal of the regional Studies Association*, 28(1): 39~51.
- Seinfeld, J.H., and S.N. Pandis (1998), *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, John Wiley & Sons, New York.
- Wackernagel, M. and W.E. Rees (1996), *Our ecological footprint: reducing human impact on the earth, Canada*, New Society Publishers.