경기도 도시지역 환경대기질의 시공간적 추이와 특성

김종찬[†]

서울과학기술대학교 환경공학과

Temporal and Spatial Variation and Characteristics of Ambient Air Quality in Urban Areas in Gyeonggi Province

Jong-Chan Kim[†]

Department of Environmental Engineering, Seoul National University of Science and Technology,
Seoul, Korea

ABSTRACT

Objectives: The purpose of this study was to provide policy directions for air pollution reduction by analyzing the variation in the characteristics of air contaminants around the Gyeonggi Province area.

Methods: The data used in the study was obtained from air quality monitoring stations operated by the Gyeonggi Provincial Government. The target area was the air quality management area of the Gyeonggi Province region.

Results: The concentration of PM₁₀ (particles measuring 10 µm or less) in 2009 was 60 µg/m³, which has been reduced by about 2.7% per year after improvement countermeasures were emplaced. The air pollution control policy was especially more effective for coarse particulate matter (CPM, PM_{10-2.5}). The improvement of NO₂ pollution was generally very low, especially in cities which had considerable automobile traffic. The concentration of SO₂ pollution was rapidly improved in industrial areas, but did not show any difference for multiple and general cities. The predicted concentration of PM₁₀ for 2014 based on the trend over 2001-2009 was 53.4 µg/m³, which fails to meet the target concentration of 40 µg/m³. The predicted concentration of NO₂ shows a very low probability of achieving the target concentration of 22 ppb, and thus the current improvement of air quality has proven unsatisfactory.

Conclusion: Air pollution control policy should be enforced according to regional pollution characteristics in order to obtain maximum effectiveness in improvement.

Keywords: air quality, PM₁₀, nitrogen dioxide, sulfur dioxide

I. 서 론

경기도를 포함한 수도권은 국토면적의 12%에 불과하지만 인구는 약 49%가 집중되어 있고 자동차는 약 46%를 초과하고 있으며 에너지사용량의 약 34%가 소비되고 있을 뿐만 아니라 현재도 급속하게 증가하고 있는 실정이다. 이로 인해 대기오염은 전진

국의 주요도시에 비해 매우 심하며 수도권이 아닌 타 도시에 비해서도 매우 심각하게 나타나고 있다.¹⁾

이에 따라 환경부에서는 대기오염과 상관성이 큰 에너지정책과 산업정책, 도시계획 등 관련정책을 통합적으로 추진하기 위하여 2002년 경기도를 비롯한 수도권 지역의 종합적인 대기오염 개선을 위한 수도권 대기환경개선 대책을 수립하였고 2005년 1월

[†]Corresponding author: Department of Environmental Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea, Tel: +82-2-970-6619, Fax: +82-2-971-5776, E-mail: kjc2580@seoultech.ac.kr

Received: 26 March 2012, Revised: 14 May 2012, Accepted: 26 June 2012

1일부터 수도권 대기환경개선에 관한 특별법을 시행하고 있다. 아울러 수도권 대기오염개선을 위하여 2014년까지 선진국 수준의 목표를 설정하고 추진하기 위한 기본계획을 수립하였으며 이에 따라 경기도에서는 기본계획을 토대로 2007년 1월부터 경기도 대기질 개선 시행계획을 수립하여 추진하고 있다.⁴⁾

대기환경개선 시행계획에서 제시하고 있는 대기오염 개선목표는 맑은 날 관악산에서 서해바다가 보이는 대기환경을 확보하기 위해서 미세먼지와 NO₂의 농도를 선진국 주요도시 수준으로 개선하는 것이다. 목표연도인 2014년 PM₁₀과 NO₂에 대한 농도는 각각 연평균 40 µg/m³과 22 ppb이다. 이것을 달성하기 위해 천연가스차 등 저공해자동차 보급과 매연후처리장치 부착 등 운행자동차 저공해사업, 사업장오염물질 총량관리 및 배출권거래제 도입, 주유소에 휘발성 유기화합물질 회수장치부착 등 VOC 관리강화, 환경친화적 에너지관리 등을 추진하고 있다.¹⁾

이와 같이 대기환경개선을 위해 많은 저감정책을 수행하고 있어 경기도의 대기환경은 그동안 많은 개선을 보인 것은 사실이다. 그러나 많은 예산과 시간을 투입하여 얻어지는 개선효과는 효율적이라고 보기에는 미흡한 점이 많이 나타나고 있다.

따라서 본 연구에서는 24시간 연속 측정되는 자동 측정 자료를 이용하여 대기환경개선이 미흡한 지역을 도출하고 향후 저감대책의 방향을 제시하고자 하였다. 연구의 목적은 첫째 경기도 대기관리권역의 항목별 대기오염현황을 연도별과 계절별 및 권역별로 분석하여 시공간적 특성에 따른 저감 정책의 방향을 제시하고자 하였다. 둘째 대기관리권역의 대기오염현황을 농도곡선으로 공간적인 오염분포를 도시하고 지역적인 오염 원인을 분석하였으며 대기환경개선 계획의 시행으로 나타난 농도 추이를 바탕으로 목표연도인 2014년의 농도를 예측하여 목표달성 가능성을 검토하였다. 셋째 대기관리권역을 용도지역과 공기도동권역 및 도시화율에 따라 구분하고 연구대상항목의 배출저감실적과 오염특성과의 관계를 고찰하였다.

II. 연구재료 및 방법

1. 시·공간적 범위

본 연구의 대상지역은 수도권 대기환경개선에 관한 특별법에서 지정하고 있는 대기관리권역으로 경

Table 1. Urbanization of the study area

	City	Urbanization Ave. (%)
General City	Suwon, Seongnam, Guri, Uijeonbu, Anyang, Gunpo, Bucheon, Ansan, Goyang, Gwacheon, Osan, Siheung, Uiwang, Dongducheon, Hanam, Gwangmyeong,	100
Multiple Cities	Pyeongtaek, Namyangju, Yongin, Paju, Icheon, Kimpo, Hwaseong, Yangju	81

Fig. 1. Regional group by according to the movement path of air.

기도 대상지역은 Table 1과 같다. 도시화율에 따른 구분은 국토해양부 도시계획현황 통계에 따라 도시화율이 100%인 지역은 일반도시로 100% 미만인 지역은 복합도시로 구분하였다.²⁾ 또 대상지역을 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」에 따라 공업, 상업, 주거, 녹지지역으로 세분하여 지역별 오염특성을 분석하였으며, 대기오염이 고농도로 나타날 때 시간별 농도 분포에 따른 공기의 이동사례를 분석하여³⁾ Fig. 1과 같이 4개 권역으로 구분하여 대기오염물질의 공간특성을 분석하였다. 시간적 범위는 경기도 대기환경개선 시행계획에서 설정하고 있는 기간으로 기준연도는 2001년이며 중기목표연도인 2009년까지 대기오염실태를 대상으로 하였다.

2. 연구자료

본 연구에 사용된 자료는 경기도가 운영하고 있는

대기오염자동측정망 중에서 대상지역에 설치된 측정소의 자료를 이용하였으며 항목은 수도권 대기환경 개선에 관한 특별법에서 관리대상으로 하고 있는 SO_2 , NO_2 , PM_{10} 을 대상으로 하였다. 또 지역별 개선특성을 분석하기 위하여 오염물질 배출량 저감실적과 예측농도 및 목표농도는 경기도 대기환경개선 시행계획에서 제시한 자료를 이용하였다.

III. 결 과

1. 연도별 대기오염 현황

수도권 대기질 개선에 관한 특별법에서 지정하고 있는 경기도 대기관리 권역은 수원시 등 24개시이며 대기질 개선을 위한 관리대상 항목은 PM_{10} , NO_2 , SO_2 , VOCs이다. 경기도에서는 대기환경 개선을 위

해 저감해자동차보급, 사업장 총량제, 지역난방보급 등 저감사업을 추진 중에 있다.⁵⁾ 수도권 대기환경 개선의 기준연도인 2001년부터 중기목표연도인 2009년까지 관리대상 항목의 연도별 변화 추이는 Fig. 2와 같다.

PM_{10} 은 지속적으로 감소되어 2001년 $68 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 2009년에는 $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 연평균 약 1.5%씩 감소한 것으로 나타났다. 대기환경개선 시행계획이 시작된 2007년부터 2009년까지의 농도감소율은 연평균 약 3.9%로 나타나 저감정책 시행이전보다 대기오염개선 정도가 빠르게 진행되고 있다. 또한 같은 기간 대기환경개선 계획이 시작된 서울시와 인천시는 각각 3.3%, 3.9% 감소하여 수도권 모든 시도의 연평균 농도 감소율은 비슷하게 나타났다. NO_2 는 2001년 0.030 ppm에서 2009년에는 0.028 ppm으로 미세한 감소를 나타내고 있다. 특히 대기환경개선 계획이 시행되고 있는 2007년 이후 2009년까지 0.001 ppm 감소에 불과한 것으로 나타났다. 수도권 모든 시도가 같은 경향을 나타내고 있으며 이는 꾸준한 저감대책의 시행에도 불구하고 자동차와 같은 배출원의 증가와 도로이동 오염원 이외의 배출원 관리가 미흡했던 것이 원인으로 지적된다. 따라서 중장비와 농기계, 선박 등 비도로 오염원의 관리강화와 면오염원에 대한 대책이 필요한 시점이라 할 수 있다.

SO_2 는 저황유의 사용으로 수도권 전체에서 아주 낮은 농도로 측정되고 있으며 2007년 대기환경개선 대책 시행이후 대기 중 농도가 더 낮아지고 있다.

2. 계절별 대기오염 현황

중국의 풍하측에 위치한 한반도는 장거리 이동되는 대기오염물질로 인한 영향을 많이 받고 있다. 관리대상 오염물질을 계절별로 분류하여 연도별 변화 추이를 Fig. 3에 나타냈다. PM_{10} 은 봄과 겨울철 오염도가 현저하게 개선된 것으로 나타났다.

대기환경개선 대책 시행이후 봄과 겨울의 연평균 농도 감소율은 각각 8.7%와 6.9%였으며 반면 여름과 가을은 변화가 없거나 오히려 미세하게 증가하고 있다. 봄과 겨울철의 미세먼지 오염도가 개선되는 것은 저감대책의 시행효과와 황사 농도의 감소 등이 영향을 미친 것이라고 할 수 있다. NO_2 와 SO_2 는 4계절 모두 연도별 변화가 매우 약하게 나타나고 있

Fig. 2. Annual air quality trends of metropolitan area.

Fig. 3. Seasonal PM₁₀, NO₂, and SO₂ trends during 2001-2009.

으며 계절에 따른 농도 차이가 매우 크게 나타나고 있다. 다만 대기환경개선 대책이 시행된 이후 겨울철에 한해서 NO₂와 SO₂의 농도가 감소된 것으로 나타나고 있다. 북서기류가 강하게 나타나는 겨울철의 대기오염은 중국으로부터 유입에 의한 영향을 많이 받으므로 국내에서 발생하는 대기오염물질의 규제나 관리뿐만 아니라 대기오염물질의 장거리 이동과 침적에 대한 정확하고도 정량적인 자료의 확보가 필수적이다.⁶⁾

3. 권역별 대기오염 현황

중기목표연도인 2009년을 기준으로 대기오염 농도가 개선되고 있는 관리대상항목의 공간분포 특성을 나타낸 결과 Fig. 4와 같다. PM₁₀은 도시화가 완전히 진행된 일반도시보다는 교외 복합도시의 오염도가 높게 나타나고 있음을 알 수 있으며 NO₂는 자동

Fig. 4. Spatial distribution of (a) PM₁₀, (b) NO₂ and (c) SO₂ in 2009.

차의 통행이 많은 중부권역의⁴⁾ 농도가 다른 권역에 비해 농도가 높은 것으로 나타나고 있다. SO₂는 환경기준을 완전히 달성하고 있지만 공업지역의 농도가 다른 지역에 비해 월등히 높은 것으로 나타나고 있다.

4. 대기오염 예측

2014년의 목표농도를 예측하고자 2001년을 기준으로 PM₁₀의 농도 변화추이를 분석한 결과 얻은 추

Fig. 5. Prediction of PM₁₀ and NO₂ concentration.

정식은 다음과 같다.

$$Y = -1.1X + 68.8 \quad (1)$$

추정식에 의해 목표연도인 2014년의 농도를 예측한 결과 PM₁₀은 53.4 µg/m³로 목표를 크게 달성하지 못하는 것으로 나타났다. 그러나 기간이 짧아 신뢰성이 떨어지기는 하지만 대기환경개선계획이 시작된 2007년을 기준으로 하여 얻은 추정식($Y = -2.0X + 65.5$)에 의해 2014년의 농도를 예측하면 PM₁₀은 47.5 µg/m³로 목표를 달성하지는 못하지만 근접하는 것으로 나타났다. NO₂는 기준연도인 2001년부터 최근까지 연도별 오염도 변화가 거의 없었으며 2007년부터는 대기환경개선계획이 시행되었음에도 불구하고 농도개선은 나타나고 있지 않아 보다 강력한 저감대책을 강구하지 않는 한 목표달성은 매우 희박한 것으로 나타났다.

IV. 고 찰

1. PM₁₀ 배출저감과 개선특성

PM₁₀은 대기 중의 SO₂와 복합적으로 작용하여 기

Fig. 6. Average PM₁₀ reduction rate during 2007-2009 in Urban Areas of Gyeonggi Province.

Fig. 7. Change of PM₁₀ concentration on target area during 2001-2009.

침 천식 등 각종호흡기 질환을 유발하거나 시정거리를 감소시키는 등 다양한 사회적 비용을 유발하게 된다. PM₁₀ 농도 10 µg/m³ 증가는 소아천식 입원위

험을 0.9% 높이고 특히 저소득군의 어린이 천식 입원위험은 1.78% 증가하는 것으로 보고되고 있다.⁷⁾ 2007년부터 대기환경 개선계획의 시행으로 나타난 PM_{10} 의 배출량 저감실적과⁸⁾ 대기오염 농도변화는 Fig. 6 및 7과 같다. 매년 저감 총량은 증가하고 있으나 대부분의 배출량 저감이 도로이동분야와 친환경에너지 분야에서 추진되고 있음을 알 수 있다.

배출량 저감에 의한 대기오염 농도변화 추이를 보면 지역별로는 공업지역이 뚜렷한 개선효과를 보였으며 근래에 들어서면서 지역별 농도차이가 나타나지 않는 추세를 보이고 있다. 권역별로는 서북권역의 개선효과가 뚜렷이 나타나고 있으나 아직 높은 농도를 보이고 있으며 반면 동부권역은 훨씬 낮은 농도를 나타내고 있다. 도시 형태별 농도의 연도별 변화추이는 일반도시에 비하여 복합도시의 개선효과가 뚜렷하게 나타나고 있으며 도시별 농도차이가 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 PM_{10} 배출량 억제 정책이 경유를 사용하는 중대형 자동차 중심의 도로 이동분야가 대부분으로 추진되면서⁸⁾ 중대형 경유 자동차의 통행량이 많은 공업지역 등에서 오염도가 상대적으로 많이 개선된 것으로 평가된다.

그러나 같은 측정소에서 $PM_{2.5}$ 가 동시에 측정된 자료를 분석한 결과 Fig. 8에서와 같이 입자크기가 $2.5\sim10\mu m$ 인 조대입자의 $PM_{2.5-10}$ 은 감소한 반면 입경 $2.5\mu m$ 이하 미세입자 $PM_{2.5}$ 는 증가하는 것으로 나타났다. 종합적으로 평가하면 PM_{10} 오염도는 공업지역과 서북권역 및 복합도시에서 입자의 크기가 $2.5\sim10\mu m$ 이하인 조대입자의 개선효과가 높았으며 다른 지역은 개선효과가 미흡한 것으로 나타났다. 따라서 도로비산먼지와 사업장 및 면오염원 등 다양한 분야의 배출량 저감과 조대입자보다 인체 위해성이

Fig. 8. PM_{10} and $PM_{2.5}$ trends of air pollution.

크고 사망률과 깊은 관련성이 있는¹⁰⁾ 입경 $2.5\mu m$ 이하 미세입자를 감소시킬 수 있는 2차 입자의 저감대책이 필요한 것으로 사료된다.

Fig. 9. Average NO_2 reduction rate during 2007-2009 in Urban Areas of Gyeonggi Province.

Fig. 10. Change of NO_2 concentration on target area during 2001-2009.

2. NO₂ 배출저감과 개선특성

NO₂는 관리대상 종목 중에서 가장 낮은 개선정도를 나타내고 있다. 대기환경개선 계획의 시행으로 나타난 NO₂의 배출량 저감실적과 대기오염 농도변화는 Fig. 9 및 Fig. 10과 같다.

배출량 저감이 가장 많은 부분은 사업장 부분이며 다음은 도로이동부분인 것으로 나타났다. 배출량 저감으로 나타난 대기오염 농도변화를 보면 용도지역별로는 뚜렷한 특성을 보이지 못하고 있다. 배출량 저감은 사업장 분야에서 대부분 이루어지고 있으나 NO₂의 배출 기여도가 가장 높은 이동오염원의 영향으로 지역구분이 나타나지 않는 것으로 사료된다. 그러나 공기의 이동경로에 따라 구분한 권역별로는 중부권역의 농도가 가장 높고 서북권역의 농도가 가장 낮게 나타났다. 원인을 분석하면 중부권역은 서북권역에 비하여 차량통행이 많고⁴⁾ 인구가 집중되어 있는 곳으로 연료의 소비량이 많아 연소에 의한 배출가스가 대기 중 NO₂ 농도를 증가시키는 것으로 판단할 수 있다. 도시 형태별 대기오염 농도는 일반도시가 복합도시보다 훨씬 높은 농도를 나타냈다. 임등(2008)도 확산추정기를 이용한 대전시 주요 도로변 NO₂ 공간분포를 조사한 결과 지역별 평균농도는 큰 차이를 보이지 않았지만 녹지 및 교통량이 적은 지점 등 주변 환경에 의해 농도차가 크게 나타난 것으로 보고하였다.⁹⁾ 종합적으로 NO₂의 개선현상은 아주 미세하게 나타나고 있으며 자동차 통행량이 많고 도시화가 완전히 진행된 중부권역 일반도시에서 농도는 높은 반면 개선효과는 낮은 것으로 나타났다.

3. SO₂ 배출저감과 개선특성

SO₂는 관리대상 항목 가운데 유일하게 환경기준을 달성하고 있는 오염물질이다. 대기환경개선 계획의 시행으로 나타난 SO₂의 배출량 저감실적과 농도변화는 Fig. 11 및 Fig. 12와 같다. 대기환경개선 계획의 시행으로 저감실적이 가장 높은 부분은 사업장부분이고 그 다음이 이동오염원부분으로 나타났다. 배출량의 저감으로 나타난 대기오염 농도변화를 보면 지역별로는 공업지역의 농도가 월등히 높게 나타나고 있으며 배출량 저감에 따라 대기농도 개선이 빠르게 나타남을 알 수 있었다. 공업지역의 농도가 높게 나타나는 것은 생산 활동에 사용되는 연료가 비교적 황 함유량이 높기 때문이며 최근에 농도가 감

Fig. 11. Average SO₂ reduction rate during 2007-2009 in Urban Areas of Gyeonggi Province.

Fig. 12. Change of SO₂ concentration on target area during 2001-2009.

소하는 이유는 저유황유 사용정책으로⁸⁾ 개선효과가 빠르게 나타나는 것으로 판단된다. 공기의 이동경로에 의한 권역별 오염특성은 북서권역에서 오염도가 지속적으로 증가하고 있으며 도시 형태에 따른 대기

오염 개선효과는 차이가 없는 것으로 나타났다. 종합적으로 SO_2 는 농도가 높은 공업지역의 오염도는 빠르게 개선되고 있으나 북서권역의 오염도는 증가하고 있으며 도시 형태에 따른 개선효과는 차이가 없는 것으로 나타났다.

V. 결 론

수도권 대기환경 개선에 관한 특별법의 시행으로 나타난 경기도 도시지역의 대기오염 변화특성을 시공간적으로 분석하고 대기환경개선이 미흡한 지역을 도출하여 향후 저감정책의 방향을 제시하고자 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. PM_{10} 은 매년 1.5%씩 감소하는 것으로 나타났으며 NO_2 와 SO_2 는 연도별 변화가 없는 것으로 나타났다. 계절별로는 PM_{10} 은 봄과 겨울에 NO_2 와 SO_2 는 겨울철 오염도가 개선되고 있는 것으로 나타났다.

2. PM_{10} 은 일반도시보다는 복합도시의 오염도가 높게 나타났고, NO_2 는 중부권역, SO_2 는 공업지역의 농도가 다른 지역에 비해 높은 것으로 나타났다.

3. 대기질 농도를 예측한 결과 PM_{10} 과 NO_2 의 경우 목표농도 달성이 매우 희박한 것으로 나타났다.

4. 배출량 저감실적과 오염특성을 분석한 결과 PM_{10} 은 이동배출원 저감실적이 높았으며 일반도시보다는 복합도시에서 오염도가 높았다. NO_2 는 오염도 변화가 미세하게 나타나고 있으며 SO_2 는 공업지역의 오염도가 빠르게 개선되고 있는 것으로 나타났다.

이와 같이 대기환경개선을 위해 많은 저감정책을 수행으로 그동안 대기환경은 많은 개선을 보이고 있지만 막대한 예산과 시간을 투입하여 얻어진 개선효과는 효율적이라고 보기에는 미흡한 점이 많이 나타나고 있다. PM_{10} 의 경우는 복합도시의 농경지 및 나대지에서 발생되는 비산먼지와 농촌지역의 노천소각

등에 대한 개선대책이 시급한 것으로 나타났으며 NO_2 와 SO_2 는 일반도시와 공업지역의 오염도 개선이 이루어지고 있지 않아 자동차 등 이동배출원과 사업장에 대한 저감대책의 방향을 수정할 필요가 있는 것으로 나타났다. 시기적으로는 봄과 겨울철의 오염도 개선대책을 적극 시행하여야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Ministry of Environment. Metropolitan air quality management master plan; 2005.
2. Ministry of Land, Transport and maritime affairs. construction statistics 2008 urban planning. 1-1-1. urbanization trends (3); 2008.
3. Gyeonggi research institute. Improvement of air quality forecasting system; 2005.
4. Gyeonggi Province. Gyeonggi environment white paper; 2010.
5. Gyeonggi Province. Gyeonggi province plans to improve air quality; 2006.
6. Kim JY, YS Ghim, SB Lee, Moon KC. Estimation of nitrogen and sulfur deposition over the yellow sea region. *Korean J Atmos Environ.* 2003; 19(2): 217-229.
7. Bae HJ. Effects of reduced ambient PM-10 levels on the health of children in lower-income families. *J Env Hlth Sci.* 2010; 36(3): 182-190.
8. Metropolitan air quality management office. Metropolitan air quality improvement action plan outcomes assessment report; 2009.
9. Yim BY, Kim ST, Yang HM. Nitrogen dioxide measurement with diffusive passive samplers at the curbside points in daejeon. *J KOSAE.* 2008; 24(2): 143-152.
10. Kang CM, Park SK, Sunwoo Y, Kang BW, Lee HS. Respiratory health effects of fine particles ($\text{PM}_{2.5}$) in Seoul. *J Korean Soc Atmos Envir.* 2006; 22(5), 554-563.