

도로변 및 배경농도 측정망 PM₁₀ 자료를 이용한 노후 운행경유차 배출가스 저감사업 효과 해석

김철희* · 조현영 · 이승원¹⁾ · 오창석¹⁾

부산대학교 대기환경과학과, ¹⁾감사연구원

(2011년 9월 2일 접수; 2011년 10월 26일 수정; 2011년 12월 2일 채택)

Evaluation of Emission Reduction Program for In-use Diesel Vehicles Using PM₁₀ Concentrations of Road-side and Background Monitoring Network

Cheol-Hee Kim*, Hyun-Young Jo, Songweon Lee¹⁾, Chang-Seok Oh¹⁾

Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

¹⁾Audit and Inspection Research Institute, The Board of Audit & Inspection of Korea, Seoul 110-793, Korea

(Manuscript received 2 September, 2011; revised 26 October, 2011; accepted 2 December, 2011)

Abstract

Emission reduction program for in-use diesel vehicles (ERPVD) has been enacted since 2004 over the Seoul metropolitan area, and diesel emission reduction is forced to fulfill this regulation. This study was performed to evaluate the ERPVD using PM₁₀ concentrations of both road-side monitoring and national background network during the period of 2004-2010. In order to assess the pure road emission, we first eliminated the long range transport effect by deducting the trend of annual national background concentrations from the road-side PM₁₀ concentrations, and then analyzed the time series of the resultant PM₁₀ concentrations over Seoul metropolitan area.

The annual rates of variations of road-side PM₁₀ with the deduction of trend of background level show -3.2, +0.4, and -2.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{year}$, in Seoul, Incheon, and Gyonggi province, respectively. There are steadily decreasing trend in Seoul with all of statistic parameters such as mean, median, 5%ile, 10%ile, 25%ile, 75%ile, 90%ile, and 95%ile concentrations. Incheon shows some fluctuations with positive with no significant trend, and Gyonggi province shows overall decreasing but not consistent. Student-t test shows 95% significant level of ERPVD effect in Seoul, but there exists no significant level greater than 90% in both Incheon, and Kyonggi province. Total annual averaged trend over the whole Seoul metropolitan area is estimated to lie in approximately $-2.9\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{year}$ in this study, implying the intimate involvement of ERPVD to a large extent. This is also suggesting that the further research cost-effectiveness of ERPVD with consideration of the long range transport process would be needed over the Seoul metropolitan area.

Key Words : Emission reduction program for in-use diesel vehicles (ERPVD), Road-side monitoring network, Background concentration, Seoul metropolitan area

1. 서론

수도권 대기환경을 선진국 대도시 수준으로 개선할 목적으로 수도권 대기환경 개선에 관한 특별법이 발효되었고, 이 후 이를 구체화하기 위하여 수도권 대

*Corresponding author : Cheol-Hee Kim, Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan 609-735, Korea
Phone: +82-51-510-3687
E-mail: chkim2@pusan.ac.kr

기환경관리 기본계획이 발표되었다. 이 기본계획에 의하면 서울시의 경우 미세먼지 연평균 농도를 2014년에는 $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 줄이도록 되어 있으며, 이를 달성하기 위하여 사업장 총량제, 배출권 거래제, 도로 이동오염원 배출 저감을 위한 연료 전환 및 저감장치 부착 등 차량에 대한 여러 대책을 시행하고 있다. 이 중에서 가장 많은 예산이 투입된 사업인 노후 운행경유차 배출가스 저감사업(ERPDV; Emission Reduction Program for in-use Diesel Vehicles, 이하 ‘저감사업’으로 지칭함)인데, 이 사업은 지난 2005년부터 대기관리권역을 중심으로 배출가스보증기간이 지난 특정경유자동차에 대해 엄격한 배출허용기준을 정하고 기준을 초과한 차량에 대해서는 배출가스 저감장치 부착, 저공해엔진개조, 조기폐차시 보조금 지원 등 경유차의 배출에 의한 미세먼지 농도를 줄이는 것을 주요 목표로 시행하고 있다.

저감사업 시행의 5년이 지난 현 시점에서 사업과 연관된 측정망 자료를 종합하여 저감사업 전후의 대기오염 추세 및 특징을 살펴보는 것은 향후 사업추진 측면에서도 매우 중요한 연구가 될 수 있다. 측정된 대기오염 자료를 분석하여 특정 대기질 개선 사업의 효과를 분석하기 위해서는 여러 다양한 측정망 자료 중에서 이와 제일 연관이 많다고 판단되는 자료를 선정하여야 하며, 저감사업의 경우 도로변 측정망 자료의 미세먼지농도 추세를 분석이 반드시 포함되어야 할 것이다.

그러나 수도권 도로변 측정망에서 측정된 미세먼지 농도는 1 차 및 2 차 오염물질 모두를 포함한다. 즉 도로변 측정망 자료 농도에는 한 배출원이 아닌 다양한 배출원의 영향을 받으며, 지역적으로는 중국으로부터 장거리 이동되는 대기오염물질의 영향이 강하게 반영된 자료이다. 다시 말해 도로변 측정망은 국가배경 (national background) 농도, 도로상의 차량 기원의 오염농도, 도시배경 (urban background) 농도, 기타 크고 작은 다양한 기원의 농도가 모두 복합적으로 반영된 농도로 규정할 수 있다. 장거리 이동이 강한 경우 저감사업의 성과를 정량적으로 평가하기 위해서는 도로변 측정망에서 측정된 농도에서 도시 배경 농도와 비산 먼지 그리고 국가 배경대기 측정소에서 관측한 농도 등을 모두 고려하여, 적절히 관련성이 없는 대기

오염 농도를 제거하여야 비로소 순전히 이동오염원의 저감 효과를 이야기할 수 있을 것이다. 실제 환경부에서는 국가 배경 대기는 각 측정소에서 매년 측정되고 있으나, 도시 배경대기 측정을 위해서는 대도시를 둘러싼 교외지역의 배경 농도를 중심으로 최근 일부 측정소가 가동되고 있으나 아직 연도별 변화 경향을 보기에는 충분한 측정 자료가 확보되지 않은 것으로 평가되고 있다 (환경부, 2008).

본 연구에서는 현재 수집 가능한 측정망 자료인 국가 배경농도와 도로변 대기질 측정망 자료를 이용하여 저감사업과 연관시켜 그 효과를 해석하였다. 먼저 저감사업 기간의 수도권 도로변 자료로부터 주요 간선 도로의 시계열 농도 자료를 해석하고, 도로변 자료로부터 국가배경농도의 변화 경향을 적절히 제거하여 외부 요인을 제거한 순수 도로변 시계열 농도의 퍼센타일을 분석하였다. 그 결과 시행된 저감정책의 효과를 분석하고, 나아가 통계적 기법을 도입하여 분석된 결과의 신뢰도를 체크하였다.

2. 자료 및 방법

2.1. 사업 시행 내용

노후 운행경유차 배출가스 저감사업은 도로이동오염원에서 직접 배출되는 입자상 오염물질 배출량 가운데 경유 차량에 의한 배출량을 조절하여 대기의 청정도를 개선하는 정책이다. 이 정책은 배출량이 많은 노후 차량에 대하여 매연저감장치 부착 (DPF, p-DPF, DOC) 또는 저공해엔진개조를 의무화하는 것을 주요 내용으로 하고 있다. 대상 노후 차량은 수도권 대기관리권역에 등록된 경유차 중 배출가스 보증기간(총중량 3.5 톤 이상 2년, 총중량 3.5 톤 미만 5년)이 지난 경유자동차 중에서 배출가스 정밀검사결과 기준을 초과한 차량뿐만 아니라, 서울시 경유자동차 저공해 촉진 및 지원 등에 관한 조례에 의거하여 사업시행 의무화 대상 차량을 모두 포함한다. 이 외에도 저감사업에는 일정 차령 이상된 경유차량 소유자를 조기에 폐차하도록 유도하기 위하여 대상 차량에 대하여 환경개선부담금 등 각종 보조금을 지원받거나 환경개선부담금을 면제시켜주는 정책도 포함되어 있다. Table 1에 저감사업에 참여한 경유 차량의 현황을 나타내었다.

Table 1. Summary of information on the enacted strategy of ERPD(emission reduction program for in-use diesel vehicles)

Strategy enacted	Number of Participated vehicles			
	Total	2004~2005 (Tentative period)	2006~2009	
Attachment	DPF (Diesel Particulate Filter)	174,426	18,533	155,893
	DOC (Diesel Oxidation Catalyst)	146,469	17,595	128,874
Reconstruction to LPG	172,099	7,790	164,309	
Early Scrap of automobile enacted	92,763	129	92,634	
Total	585,757	44,047	541,710	

2.1. 연구 방법

측정되는 대기질 농도는 결국 다양한 배출원의 영향을 받은 최종 결과이므로 단순한 측정 자료의 분석을 통해 대기질 정책의 변화에 의한 효과를 분리해 내기는 쉽지 않다. 특히 중국으로부터의 장거리 이동 경향이 강하다는 우리나라의 지역적 특성과, 도시 배경농도가 명확히 파악되지 않은 현 시점에서 저감사업의 시행 전과 시행 중의 효과를 도출하기란 쉽지 않다. 따라서 수집 가능한 국가 배경 농도와 도로변 측정 자료의 농도의 시계열 분석을 통해 저감사업의 성과를 정량적으로 해석하기 위해서는 입자상 물질의 대기화학적 이해와 몇 가지 전제 조건이 필요하다.

입자상 오염물질에는 1 차 입자 물질과 2 차 입자 물질로 나누는데, 1 차 입자오염물질은 배출원으로부터 직접 나오는 물질로서 도로변의 자동차, 산업지의 공장굴뚝에서 배출되는 매연입자, 검댕 등 인위적 기원의 물질을 비롯하여, 황사 입자와 같이 발원지에서 바람에 의해 불려 올라간 토양입자, 해양으로부터 직접 대기로 유입되는 해양입자, 화산분출물의 자연적 기원의 물질 등을 말한다. 따라서 1 차 입자오염물질은 발생원이 매우 다양하며 입자의 크기 범위도 0.001 ~100 μm에 이르는 등 광범위하다 (Willeke와 Baron, 1993; Seinfeld와 Pandis, 1998). 그러나 2 차 입자오염물질은 해양, 미생물 활동으로 황산염이나 질산염으로 전환된 자연적 기원의 물질이 있을 수 있으나, 대부분 대기 중에서 암모니아가 질산이나 황산과 반응하여 생성되는 질산암모늄과 황산암모늄의 인위적 기원의 물질이 많으며, 이러한 인위적 기원의 입자오염물질은 대기 중의 광화학 반응에 의해 주로 생성된다.

Lenschow 등(2001)은 대도시인 독일 베를린의 미

세먼지 농도를 결정하는 요인을 크게 세 단계로 나누어 설명하였는데, Fig. 1은 이를 재구성한 것이다(서울시, 2010). Lenschow 등(2001)은 (1) 도로변 농도 (Fig. 1의 점 1)와 도시배경 (urban background) 농도 (Fig. 1의 점 2)의 차이는 도로이동오염원 (비산먼지 포함)에 의한 것으로 규정하였고, (2) 도시배경 농도와 국가 배경(regional background)농도 (Fig. 1의 점 3)의 차이는 도시 기원에 의한 영향에 의한 것으로 구분하였고 (SenStadt, 1995), (3) 국가배경 농도는 도시의 영향은 없고 동북아시아 국가간 (또는 전 지구적 차원의) 장거리 이동에 의한 것으로 나누어 분석하였다.

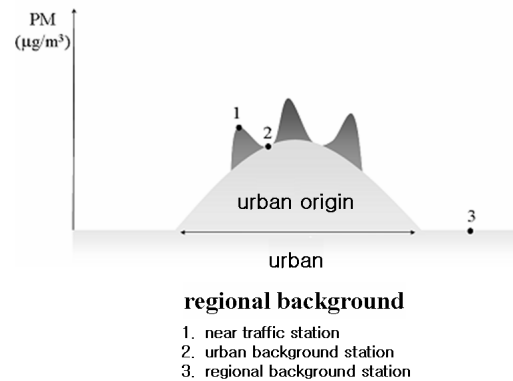


Fig. 1. Schematic horizontal profile of the ambient PM10 concentration (Lenschow et al. 2001).

그러나 이들의 방법론을 저감사업의 평가에 적용하기에는 무리가 있다. 무엇보다도 수도권의 도시배경 (urban background) 농도 수준과 그 연변화 경향을 파악하기가 어려운데, 이는 도시 배경 농도 측정소 수

가 적고 그 결과 또한 최근에 와서야 수집되고 있기 때문이다. 따라서 도시 배경 농도는 그 수준이 이미 상당하더라도, 그 연변화는 충분히 적어서 도로변 측정망 자료의 연변화 경향에는 영향을 주지 않는 것으로 가정하여 본 연구를 진행하였다. 이러한 가정을 통해 도로변 측정소에서 측정된 농도와 국가 배경대기 측정소에서 관측한 농도의 연변화 경향만을 분석하면, 운행 경유차의 배출량에 의한 경향을 정량화할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 먼저 저감사업이 진행된 기간을 포함한 2000 년~2009 년의 대기오염물질의 국가배경 농도 및 도로변 농도 측정망의 PM₁₀자료를 각각 구분하여 그 변화 추이 및 특징을 살펴보았다. 즉 PM₁₀ 농도의 시계열 자료 분석을 수행하여 연도별 평균(mean), 중위값(median), 그리고 분위수(%ile; percentile) 중

에서 5 %ile, 25 %ile, 50 %ile, 75 %ile, 95 %ile 농도의 연변화 경향을 살펴보았다. 이후 도로변 농도 자료로부터 국가배경영향을 제거한 순수한 도로변 PM₁₀ 농도를 도출하여 연도별 5 %ile, 25 %ile, 50 %ile, 75 %ile, 95 %ile의 변화 경향을 최종 분석함으로써, 저감사업의 영향을 해석하였다. 또한 해석된 결과의 신뢰도 분석을 위해 Student-t 테스트와 Mann-Whitney U 테스트를 수행하여 도로변 대기측정망 및 국가 배경농도 측정망에서 측정된 먼지의 질량농도의 시간변화 추이를 통계적으로 체크하였다.

2.3. 사용된 자료

본 연구에 사용된 자료는 수도권 도로변 대기측정망 및 국가배경농도 측정망에서 측정된 시간별 PM₁₀ 농도이며, 측정소 지점은 Fig. 2에 제시하였고, Table

Table 2. Information of monitoring sites used in this study

Type of monitoring	Province	#	Name of sites	Monitoring Period	Site locations	
					Longitude (deg, min, sec)	Latitude (deg, min, sec)
Road-side monitoring network	Seoul	1	Seoul station	Jan/02/2000 ~ present	126, 58, 17.47	37, 32, 57.80
		2	Cheonggyechun	Jan/02/2000 ~ present	126, 59, 53.10	37, 34, 07.14
		3*	Chongro	Feb/01/2008 ~ present	126, 59, 48.31	37, 34, 14.31
		4*	Gangbyunbukro	Nov/01/2009 ~ present	127, 02, 28.17	37, 32, 19.71
		5	Dongdaemoon	Jan/02/2000 ~ present	127, 00, 27.99	37, 33, 55.76
		6	Cheongrangri	Jan/02/2000 ~ present	126, 59, 53.10	37, 34, 48.60
		7	Sinchon	Jan/02/2000 ~ present	126, 56, 15.43	37, 33, 17.77
		8	Yongdongpo	Jan/02/2000 ~ present	126, 54, 17.88	37, 31, 12.08
		9	Sinsadong	Jan/02/2000 ~ present	127, 01, 10.90	37, 30, 57.90
		10*	Yangjaero	Nov/01/2009 ~ present	127, 02, 07.84	37, 28, 57.43
		11*	Guldong	Feb/01/2008 ~ present	127, 08, 49.34	37, 32, 26.24
		12*	Taenung	Nov/01/2009 ~ present	127, 04, 31.36	37, 37, 02.59
	Gonggi	1	Dongsuwon	Jul/01/2004 ~ present	127, 01, 52.77	37, 16, 41.28
		2	Moran station	Jul/01/2004 ~ present	127, 07, 44.75	37, 25, 59.34
		3*	Jungangro	Apr/01/2009 ~ present	126, 49, 41.22	37, 18, 59.96
		4	Mado station	Jan/01/2005 ~ present	126, 46, 40.40	37, 39, 07.16
		5	Gyenam park	Jan/01/2005 ~ present	126, 45, 30.10	37, 30, 19.07
	Incheon	1	Seokbawii	Jan/02/2000 ~ present	126, 41, 27.00	37, 27, 28.00
		2	Bupyong station	Aug/01/2003 ~ present	126, 43, 26.00	37, 29, 28.00
		3*	Songhyundong	Feb/01/2008 ~ present	126, 38, 14.00	37, 28, 55.00
National background monitoring network	Kyongnam	1	Jeoguri	Jan/02/2000 ~ present	128, 35, 14.82	34, 42, 36.18
	Kyongbuk	2	Taehadong	Mar/01/2000 ~ present	130, 47, 52.50	37, 31, 05.76
	Incheon	3	Deokjeokdo	Sep/01/2007 ~ present	126, 18, 57.36	37, 13, 59.94
	Jeju	4	Gosanri	Jan/02/2000 ~ present	126, 09, 42.60	33, 17, 32.20
	Chungnam	5	Padori	Jan/02/2000 ~ present	126, 07, 55.86	36, 44, 11.10

* Data not used in this study due to the limited monitoring period.

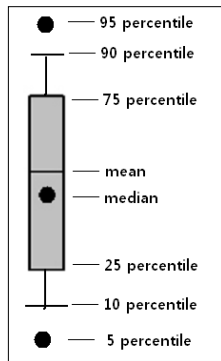


Fig. 3. Illustration of mean, median, and several percentiles of PM₁₀ concentrations.

개 측정소(서울역, 청계천, 동대문, 청량리, 신촌, 영등포, 신사동) 모두 저감사업이 시작된 2004년 이전까지는 PM₁₀연 평균(mean)농도가 전체적으로 상승 혹은 특정 농도 수준을 유지되는 특성을 보였으나, 사업이 시행된 이후에는 연평균 농도의 증가 추세가 둔화, 혹은 소폭으로 감소하는 경향을 보였다. 측정소별로 살펴보면, 2004년 이후 청계천, 동대문, 신촌, 신사동의 평균(mean)농도는 감소 경향을, 그리고 서울역, 청량리, 영등포 측정소에서는 큰 감소 경향은 보이지 않고 전반적으로 변화율이 정제되는 경향을 보였다. 제일 큰 감소폭을 보인 측정소는 신사동으로서, 2004년

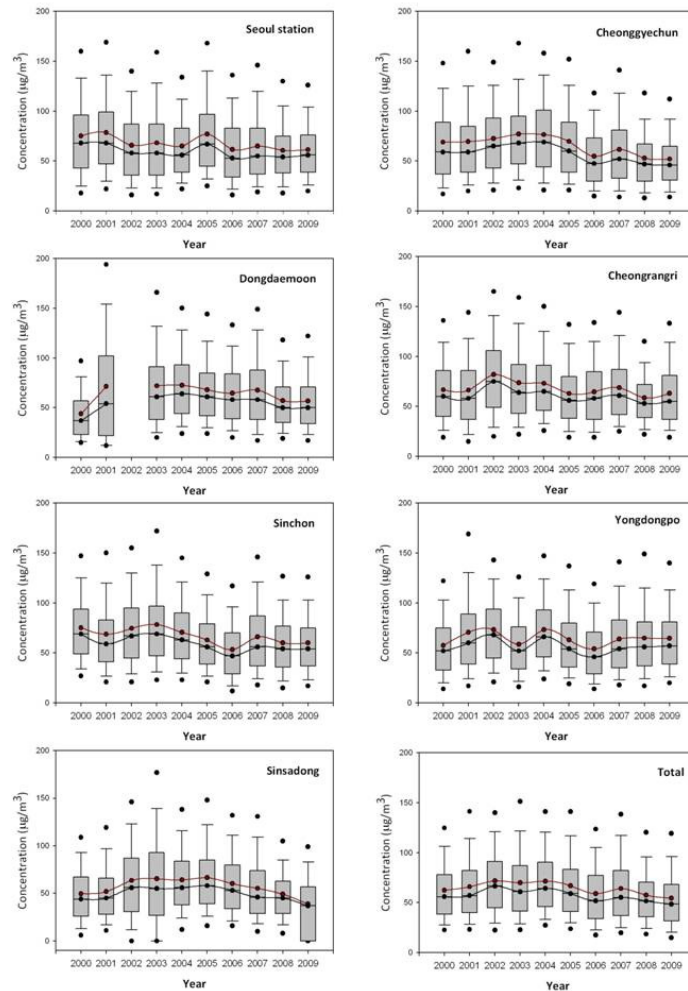


Fig. 4. Annual variations of PM₁₀ concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) observed from road-side monitoring network located in Seoul.

56.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 2009 년 37.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 연평균 5.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 평균(mean)농도의 감소율을 보였다. 중위값 또한 그 농도의 절대치가 평균치보다 적게 나타났을 뿐, 전체적으로 서울지역 전체 평균 농도와 유사한 경향을 보였다.

서울지역의 5 %ile, 10 %ile, 25 %ile의 연변화 경향은 신사동 측정소의 현저한 감소 경향을 제외하고는 모든 측정소에서 뚜렷한 경향 없이 소폭 감소하였다. 상대적으로 고농도인 75 %ile, 90 %ile, 95 %ile에서도 다소의 차이는 있으나 역시 모두 현저하게 감소하는 경향을 보였으며, 신사동, 청량리 측정소에서 그 감소율이 평균 5.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 평균 3.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 특히 그 감소 경향이 뚜렷하였다(Fig. 4). 고농도인 95 %ile 농도는 모든 측정소에서 다른 어떤 분위수보다 제일 뚜렷한 감소 경향을 확인 할 수 있는 데, 저감사업 시행 이전인 2003 년 기준으로 연 평균 4.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 감소율을 보였다. 전반적으로 7 개 측정소의 퍼센타일 수준은 모두 감소 경향을 보였는데, 그 감소 수준은 미미하였고 고농도에서 상대적으로 더 뚜렷한 감소 현상을 확인할 수 있었다. 7 개 측정소를 모두 산술 평균하여 조사한 농도 경향 또한 2004 년 이후 2007 년까지는 감소율이 2.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 매우 적은 감소 경향을 보인 반면 2007 년 이후인 2008-2009 년에는 그 감소율

이 평균 4.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 매우 주목할 만한 감소 경향을 확인할 수 있었다.

인천에 소재한 측정소에서의 지점별 측정된 PM₁₀ 농도의 연변화 경향을 Fig. 5에 나타내었다. 인천지역 도로변 측정소는 2 개소(부평역, 석바위 측정소)인데, 중위값의 범위는 2003 년 이후 측정이 시작된 인천 부평역 측정소에서 37.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 58.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2000 년 이후 측정이 시작된 인천 석바위 측정소에서 43.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 65.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 그러나 그 연변화는 감소 경향을 확인하기는 어려웠다. 오히려 부평역 측정소에서 측정된 농도는 2004 년 이후 소폭 높아진 경향을 보였고, 인천 석바위 측정소에서는 2005 년 감소 이후 최근까지 변화 없이 일정한 농도를 유지하는 경향을 보였다(Fig. 5). 또한 5 %ile, 10 %ile, 25 %ile 농도에서도 부평역 측정소에서는 2004 년 이후 유지되는 경향을, 석바위 측정소에서는 소폭 증가하는 경향을 보였다. 고농도인 75 %ile, 90 %ile, 95 %ile 역시 부평역 측정소에서는 2004 년 이후 특별한 경향을 찾기 힘든 반면, 석바위 측정소에서는 역시 소폭 증가하는 경향을 보여, 서울지역의 도로변 측정소 자료와 매우 다른 양상을 보였다. 두 측정소의 산술 평균된 연변화 또한 25 ~ 75 %ile, 10 ~ 90 %ile, 5 ~ 95 %ile 농도차의 변화 폭이 줄어드는 경향을 확인할 수 있을 뿐, 특별한

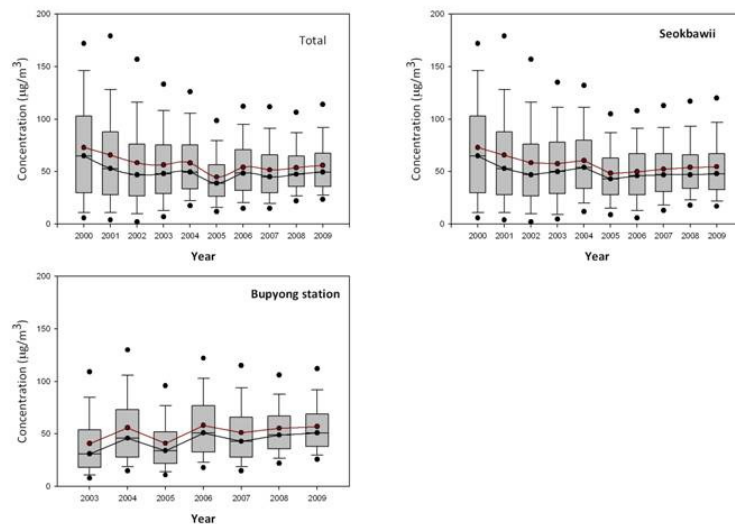


Fig. 5. Annual variations of PM₁₀ concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) observed from road-side monitoring network located in Incheon.

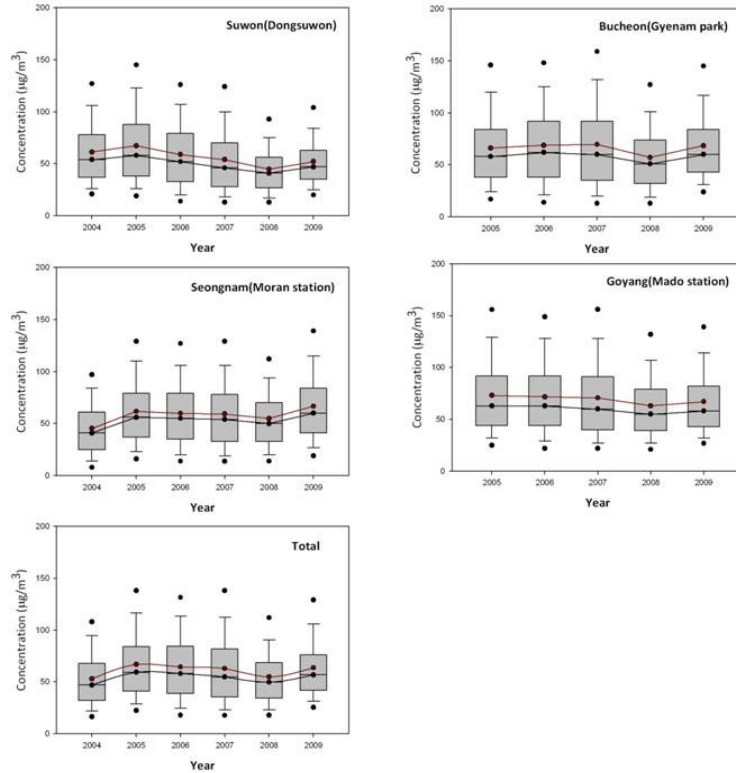


Fig. 6. Annual variations of PM₁₀ concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) observed from road-side monitoring network located in Kyonggi province.

변화 경향을 찾기는 힘들었다. (Fig. 5).

경기도의 도로변 PM₁₀ 농도 경향 (Fig. 6)은 동수원과 마두역 측정소에서는 감소 경향을, 부천 계남 공원 측정소에서는 큰 변화 없이 일정한 경향을, 그리고 성남 모란역 측정소에서는 2004년에 비해 소폭 증가한 이후 일정한 농도 수준을 유지하는 경향을 보였다.

그러나 인천 지역과 함께 경기도 지역 측정소 역시 측정소 수가 적어 통계적 해석에 유의할 필요가 있으며, 충분한 자료를 우선 확보한 후 배경농도의 경향을 종합적으로 고려하는 분석이 필요할 것으로 판단된다.

3.2. 국가배경 PM₁₀ 농도 시계열 분석 결과

대기오염물질의 장거리 이동 현상을 규명하기 위하여 환경부에서는 4 측정소 (충남 파도리, 거제 저구리, 울릉도 태하동, 제주 고산 측정소)를 국가 배경농도 측정망으로 구성하여 설치·운영하고 있다. 네 곳

중에서 충남 파도리, 거제 저구리, 제주 고산 측정소는 풍상측 (특히 중국) 대기오염물질이 우리나라로 유입되는 농도를 정량화하기 위한 측정소이며, 울릉도에 소재한 태하동 측정소는 우리나라에서 풍하측으로 유출되는 대기오염물질을 측정하기 위하여 운영되는 측정소이다. 지금까지 운영되어 측정된 PM₁₀ 농도의 연변화 경향을 살펴보기 위하여 2000년 이후 최근까지의 국가 배경 측정농도의 시계열을 분석하였다.

Fig. 7은 국가배경농도 측정소에서 측정된 PM₁₀ 농도의 연변화 경향을 나타낸 그림이다. 먼저 중위값의 범위는 울릉도 태하동 측정소에서 $25.0 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 41.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 가장 낮게, 그 다음으로 제주도 고산 측정소 ($27.0 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 42.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에서 낮게 측정되었고, 그리고 충남 파도리 측정소 ($37.0 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 55.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)와 거제 저구리 측정소 ($33.0 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 51.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에서는 유사한 농도 수준을 보였다. 본 연구의 집중 분석 기간인

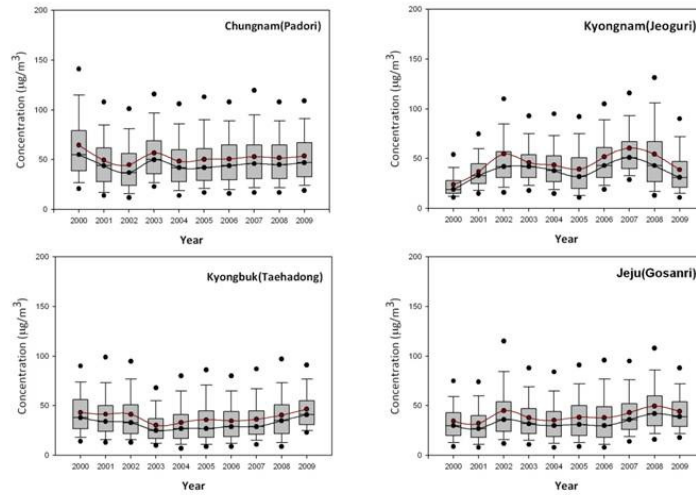


Fig. 7. Annual variations of PM₁₀ concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) observed from national background monitoring network.

2004 년 이후의 중위값 농도 경향은 연변화 경향이 강하여 그 증감 경향을 가늠하기 힘든 거제 저구리 측정소를 제외하고는 충남 파도리 측정소에서는 일정 수준을 유지하였고, 울릉도 태하동 측정소와 제주 고산 측정소에서는 소폭 증가하는 경향을 보였으며 그 증가폭은 울릉도 태하동 측정소에서 더 크게 나타났다. 네 곳 모두 그 중위값은 $43.9 \mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 3.4$ 수준이고 그 연변화 경향은 크지는 않지만 측정소별 다양하였다. 또한 도로변 측정소와는 달리, 국가배경농도 측정소에서는 모든 측정소에서, 낮은 분위값인 5 %ile, 10 %ile, 25 %ile과 높은 분위값인인 75 %ile, 90 %ile, 95 %ile 농도가 모두 평균 혹은 중위값과 대부분 일치하는 경향을 보였다. 이는 측정소의 주변영향이 적어 국가 배경 농도만을 측정하기 위한 측정소 본래의 목적에 잘 부합되는 결과로 보이며, 장거리 이동에 의한 배경농도 변동 폭이 일정하여 장기적인 안목에서 국가 배경 농도의 영향을 정확히 분석할 수 있는 가능성을 암시한다.

본 연구에서는 저감사업 평가 측면에서, 풍상측인 중국에서 수도권으로 장거리 이동되는 영향을 제거하기 위한 것이 목적이므로 측정소 중에서 상대적으로 수도권과 중국에 가까운 충남 파도리 측정소의 자료를 이용하였다. 즉 수도권 도로변 대기질 측정소의 연변화 경향에서 장거리 이동량을 국가 배경농도 경향

에서 찾고, 이 영향을 제거하여 최종 나타나는 시계열 변화를 분석하였다.

3.3. 도로변 대기질 자료 종합 분석 및 저감사업 성과 해석

분석 기간 매일 매시간 수도권 도로변 측정망 자료에서 충남 파도리 측정소 자료를 감한 순수 도로변 계산 농도, 즉 ‘순수 도로변 계산 농도’= ‘도로변 측정농도’-‘국가배경농도’로 정의하고, 계산된 농도 경향을 동일한 방법으로 분석하였다.

Fig. 8은 서울지역의 순수 도로변 PM₁₀ 중위값의 연변화 경향을 나타낸 그림이다. 그 결과 2004 년 이후 순수 도로변 PM₁₀ 평균 중위값은 $-2.2 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 27.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 크지 않은 범위를 확인 할 수 있었다. 특히 청계천 측정소와 신사동 측정소에서는 2009 년 각각 $-1.59 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 $-14.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 소폭이긴 하지만 음(-)의 값을 보여 저감사업으로 인한 농도 저감효과가 이미 극대화되었음을 반증하였다. 각 측정소별 중위값의 연변화 경향은 국가 배경 농도를 제거하기 이전의 도로변 측정 자료의 중위값의 연변화 경향보다 더 뚜렷한 감소 경향을 확인 할 수 있고, 그 감소형태도 대부분 선형적인 경향을 보였다. 저감사업이 시행된 2004년 이후를 살펴보면, 신사동 측정소에서의 감소 경향이 제일 크게 나타났고 (연평균 감소율 $-6.1 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{year}$), 그 다음으로 동대문 측정소(연평균 감소율 -4.1

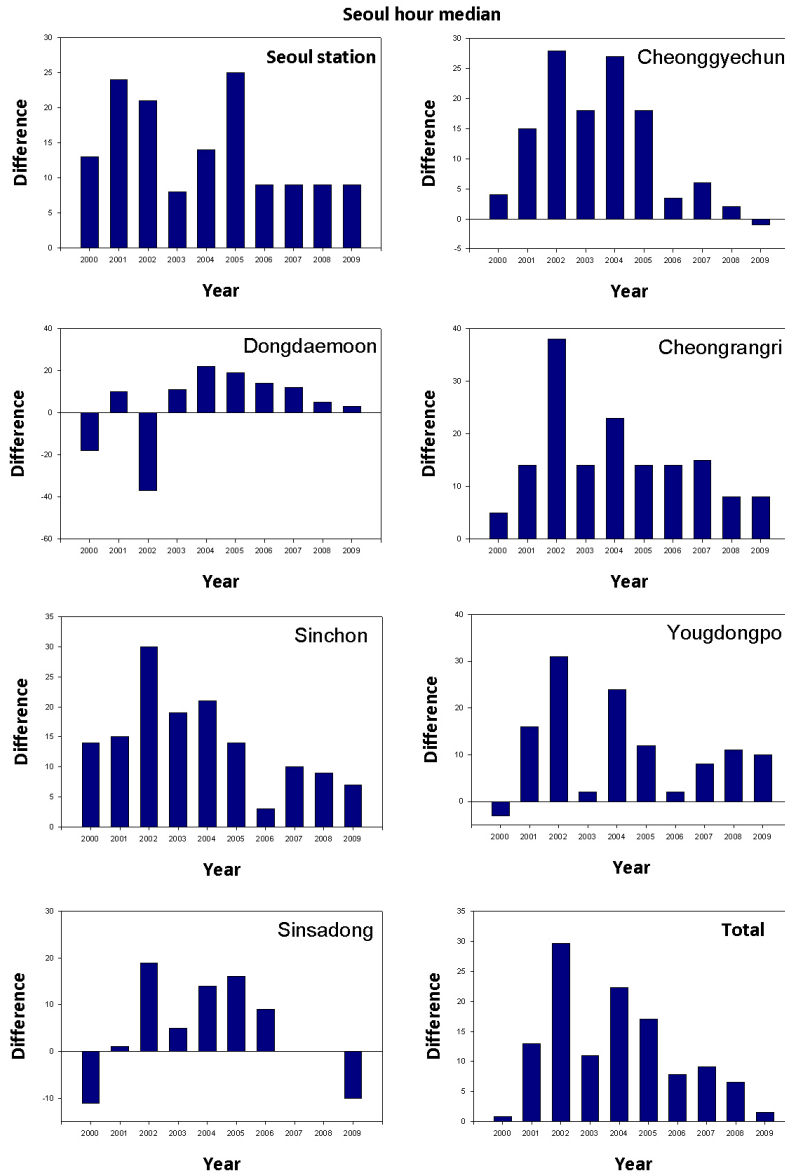


Fig. 8. Annual variations of PM₁₀ concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) observed from road-side monitoring network of Seoul with the deduction of national background concentration level.

$\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{year}$), 청계천 측정소(연평균 감소율 $-3.9 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{year}$)순으로 나타났고, 서울시의 전체 평균 감소율은 약 $-3.2 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{year}$ 로 계산되었다(Fig. 8).

본 연구의 분석에 사용된 자료는 모두 시간평균자료를 사용하였으나, 청계천과 신사동 등 일부 측정소

에서 음(-)의 값을 나타낸 것은 측정된 시간평균 농도의 변동 폭이 크거나 극한 값이 반영되었을 소지가 있다고 판단되어 시간평균자료가 아닌 일평균 자료로 환산하여 중위값을 추출하여 그 변동성을 계산하였다. 그 결과 시간평균 자료 처리 결과에서 나타난 음(-)

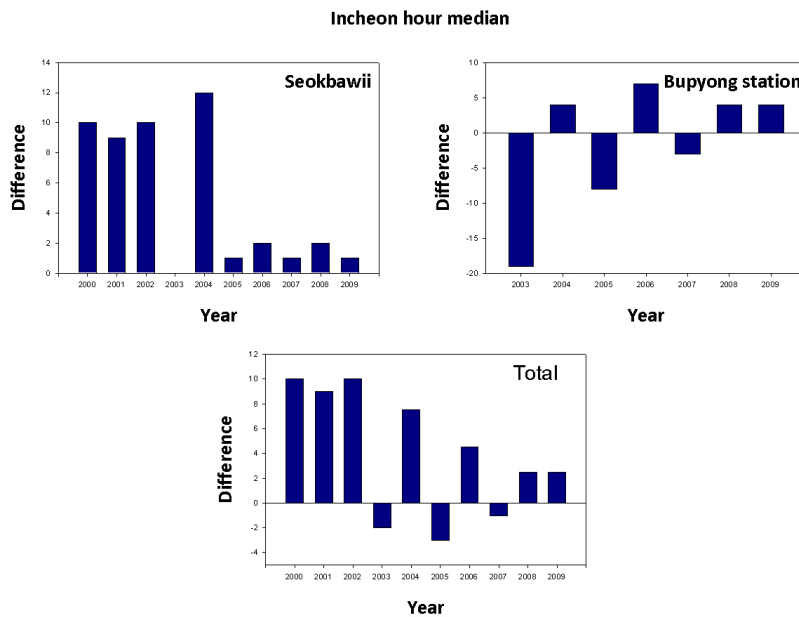


Fig. 9. Annual variations of PM₁₀ concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) observed from road-side monitoring network of Incheon with the deduction of national background concentration level.

의 증위값은 크게 줄었으며 (특히 신사동 측정소) 그 연변화 경향은 Fig. 8의 시간 평균 자료를 이용한 결과와 거의 일치함을 확인하였다(그림으로 나타내지 않았음). 결국 서울지역만 놓고 볼 때 농도의 감소 경향은 뚜렷이 확인이 되고 있으나, 평균 감소율이 $-3.2 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{year}$ 에 불과하여 저감사업에 투입된 비용대비 환경 효율(cost-effectiveness) 평가가 추가적으로 필요함을 암시하였다.

Fig. 9는 인천지역의 순수 도로변 계산농도의 증위값의 연변화 경향을 나타낸 그림이다. 특히 석바위 측정소(Station 2)에서는 변동폭이 커서 년도에 따라 음(-)의 값을 보여 무엇보다도 자료의 개수와 측정소 수가 적은 인천 지역에서는 저감사업을 평가하기에 무리가 있음을 반증하였다. 인천지역의 순수 도로변 계산농도의 증위값의 변화 경향을 국가 배경 농도를 제거하기 전의 변화 경향과 비교하여 볼 때, 2004년 이후 특별한 경향이 없고 일정하거나 혹은 반대로 오히려 증가하는 경향을 보이기도 하였다(Fig. 9). 평균적으로는 최근으로 갈수록 그 변화 폭이 적어지는 경향을 보였으며, 감소율 또한 $-0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{year}$ 정도로 미미하게 나타났다. 이것은 여러 측면에서 그 원인을 찾아

볼 수 있는데, 인천 지역은 해안 지역에 인접한 인천 지역의 지리적 특성상 서해상으로부터 이동해 오는 해염입자 등의 외부 요인의 연변화 경향이 다를 수 있는 사실과, 해륙풍 등 지역풍의 영향 등 다른 지역에 비해 더 많은 외부 요인이 존재하여 도로변 자료의 연변화 경향에 기여하였을 가능성, 그리고 다소 거리가 있는 충남파도리 국가배경농도측정소 자료의 시계열 변화가 중국과 제일 인접한 인천의 경우를 잘 대표하지 못하였을 가능성, 그리고 본 연구에서 일정하다고 가정할 도시 배경농도의 연변화 경향이 해안지역인 인천에서는 그 변동 폭이 크거나 다르게 나타날 수 있는 가능성 등이 존재할 수 있다. 특히 인천 석바위 측정소의 경우 국가 배경 농도보다 낮은 농도 또한 다수 존재하므로 보다 신뢰성 있는 분석을 위해서는 도시 배경농도, 국가 배경농도 등 다수의 배경농도 자료가 장기간 축적되어야 할 것으로 판단된다.

동일한 방법으로 경기지역 측정소를 대상으로 계산한 도로변 PM₁₀ 시간평균 농도경향을 Fig. 10에 나타내었다. 네 측정소 모두 2004 년보다 2005 년에 더 높은 농도를 보였고, 저감 사업을 시작한 그 다음 해인 2005 년 이후에는 다소 감소하는 경향을 보였다. 그

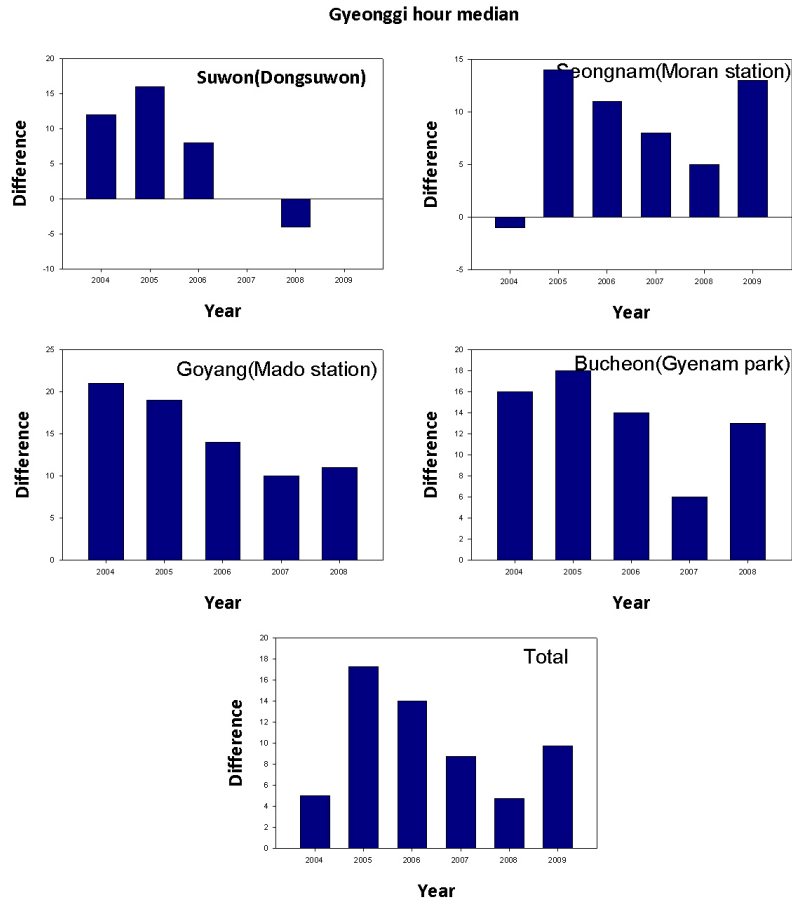


Fig. 10. Annual variations of PM₁₀ concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) observed from road-side monitoring network of Gyeonggi province with the ducton of national background concentration level.

감소 경향은 동수원 측정소에서 가장 높게 나타났으며(연평균 감소율 $-4.4 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{year}$), 그 다음으로 고양 마두역 측정소에서 나타났고(연평균 감소율 $-2.9 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{year}$), 경기지역 전체 감소율은 $-2.4 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{year}$ 로 계산되었으나, 매년 변화율의 경향은 선형적으로 감소한 서울과는 달리 일정한 경향을 보이지는 않았다. 특히 성남 모란역 측정소와 부천 계남공원 측정소에서는 최근 년도에는 오히려 그 직전 년도보다 오히려 높게 나타났고 그 변동성도 크게 나타나, 인천지역과 마찬가지로 보다 많은 자료 확보가 필요할 것으로 판단된다.

3.4. 통계적 신뢰도 분석

이상의 도로변 자료의 감소 경향은 2004년 이후 기준으로 서울지역 $-3.2 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{year}$, 인천지역 $0.14 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{year}$, 경기지역 $-2.4 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{year}$ 로 계산되었다. 이렇게 계산된 농도 감소율(Fig. 11)이 얼마나 통계적으로 신뢰도가 있고 유의한지를 검증하기 위하여 Student-t test를 수행하였다. 여기서 검증하고자 하는 가설은 저감사업 도입 후 PM₁₀ 농도가 매년 줄어들고 있다는 내용을 대립가설로 설정하고 단측 검증을 수행하였다. 자료 수(N) = 24 시간 × 365 일 × 6년 × 지역별 측정소 개수를 이용하였고, 자유도는 N-1의 t-분포를 이루게 된다. 본 연구에서는 2004년 이후의 자료뿐만 아

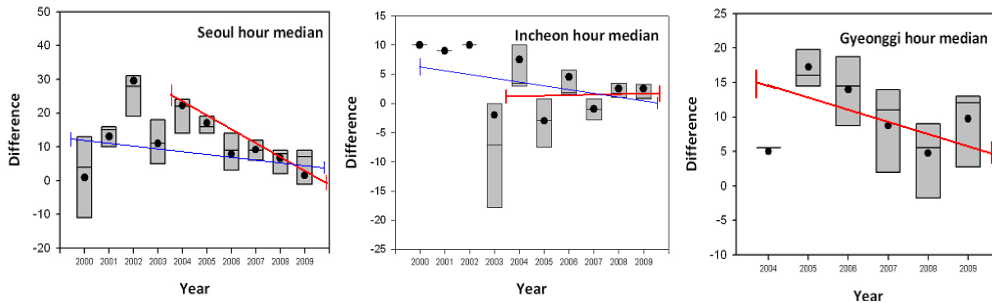


Fig. 11. Annual variation of median road-side concentration with the deduction of national background concentration level. Regression lines show for the period of both the whole analysis period and ERPDV enacted years only.

나라 수집된 모든 자료, 즉 2000 년 이후자료에 대해서도 동일하게 적용하여 분석하였다.

그 결과 서울, 인천, 경기도는 지역 자료마다 그 변동성이 다르게 나타났는데, 서울지역의 경우 2004 년 이전 자료까지 모두 포함한 기간, 즉 2000 년 이후 자료를 모두 포함한 결과는 모든 지역에서 90 %의 신뢰도를 확보하지 못하였다. 그러나 저감사업이 시행된 2004 년 이후 자료만을 이용하여 통계적인 유의 수준을 계산해 본 결과 서울지역에서는 사업에 따른 농도

지를 검증하기 위하여 Mann-Whitney U Test를 추가로 수행하였다. Mann-Whitney U Test는 두 모집단으로부터 독립적 확률표본이 취해질 때, 두 모집단 사이에 유의한 차이가 있는지를 검정하기 위해 사용되는 통계기법인데, 이 기법을 적용해 본 결과 서울의 경우 유의 수준 5 % 이내의 유의적인 효과가 있음을 확인하였고, 이는 Student-t test와 유사한 결과임을 확인할 수 있었다.

4. 결론

운행경유차 저감사업의 효과를 평가하기 위하여 황사일을 제외한 수도권지역 도로변 측정망 PM₁₀ 자료로부터 연변화 경향을 분석하였다. 그 결과 먼저 서울지역에서는 저감사업이 시행된 이후에는 연평균 농도가 둔화 혹은 감소하는 경향을 보였다. 서울지역은 거의 모든 측정소에서 평균값과 중위값 모두 그 연변화 경향이 감소하였고, 5 %ile, 10 %ile, 25 %ile, 75 %ile, 90 %ile, 95 %ile 모두 다소의 차이는 있으나 감소하는 경향을 확인하였다. 그러나 인천지역에서는 연변화에 있어서 감소 경향을 확인하기는 어려웠는데, 측정소가 2 개소에 불과하여 자료 확보 차원과 통계적 해석차원에서도 모두 어려움이 있었고, 따라서 충분한 자료 축적 이후에야 의미있는 결과가 도출할 수 있을 것으로 판단된다. 경기도 측정소에서는 대부분 감소하는 경향을 보였으나 지점에 따라 그 변화 폭이 없는 측정소와 아울러 농도가 감소하는 측정소가 혼재하였으며, 감소할 경우에도 그 감소폭은 서울지역보다 상대적으로 적은 수준이었다.

Table 4. Summary of results of Student-T test

	Period of 2000~2010	Period of 2004~2010
Seoul	1.08 ****	1.32 **
Incheon	0.73 ****	0.14 ****
Kyonggi Province	-	1.19 ***

* : 0.5%, ** : 2.5%, *** : 5%: ****: No change
 * Standard normal distribution of 90%, 95%, and 99% significant level is 1.10, 1.96, and 2.54 in the standard probability density function.

감소 연변화 경향은 95 % 신뢰도를 확보하였다 (Table 4). 인천지역의 경우 농도 감소 경향은 의미있는 통계적 신뢰 수준을 확보하지 못하였으며, 경기지역의 경우 그 감소 경향이 90 % 수준으로 확보되었으나, 최근 자료의 변동 폭이 커서 장기간의 자료 확보가 필요할 것으로 판단된다. 아울러 서울의 경우 동일한 방법으로 농도 감소율이 없는 경우와 유의적인 차이가 있는

국가 배경농도 자료를 이용하여 수도권 도로변 측정소 농도에 기여한 장거리 이동에 의한 농도를 제거한 도로변 농도의 연변화 경향을 분석하였다. 국가배경농도의 연변화 경향은 수도권에 가깝고 중국의 영향을 가장 직접적으로 측정하였다고 판단되는 충남 파도리 측정소의 측정농도 자료로부터 추출하였다. 그 결과 수도권 도로변 대기질 측정소의 자료에서 외부 요인 중에서 장거리 이동 효과를 포함하는 국가배경농도를 제거한 후 그 연변화 특징을 분석하였다. 국가배경농도를 제거한 도로변 측정소 PM₁₀ 농도의 순위값의 연변화 경향은 서울지역의 경우 2004년 이후 2009년 약 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 감소하여, 연감소율 -3.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{year}$, 인천지역 0.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{year}$, 경기 지역 -2.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{year}$ 로 나타났다. 특히 인천 지역의 경우 뚜렷한 변화를 파악하기는 힘들었으며, 오히려 증가하는 경향이 나타났는데, 이러한 현상은 측정소가 2 개소에 불과하고 해안에 인접하고 있어 육지보다 외부 요인이 상대적으로 더 많이 존재할 가능성이 있어서 무엇보다 이러한 요인을 파악할 수 있는 다수의 측정소 확보가 필요할 것으로 판단된다.

저감사업의 효과에 의한 미세먼지 농도 감소율이 통계적으로 얼마나 유의한지를 검증하기 위하여 Student-t test를 수행해 본 결과, 서울지역에서는 저감사업이 시작된 이후 유의 수준 95% 정도를 확보하였으나, 인천 지역에서는 감소 경향을 찾지 못하였고 오히려 증가하는 경향을 확인하였으며, 경기지역에서는 2004년 이후 농도 감소 경향이 확보되었으나, 최근 자료의 변동 폭이 커서 장기간의 자료 확보가 필요할 것으로 판단된다.

2004년 시작된 운행경유차 저감사업은 시행 이후 5년간 수도권 도로변 PM₁₀ 농도의 연평균 감소율은 -3.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{year}$, 인천지역 0.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{year}$, 경기 지역 -2.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{year}$ 로 측정소 수가 적은 인천을 제외하면 약 -(2~3) $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{year}$ 의 감소율을 기록하였으며, 서울의 경우 소폭이지만 그 감소율이 매우 꾸준하였다. 지역 구분 없이 수도권 전체의 평균 감소율은 -2.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{year}$ 로 계산되었으며, 따라서 이러한 소폭의 감소 경향은 정책 효율적 측면에서 운행경유차 저감사업에 대한 비용-편익(cost-effectiveness) 평가 연구가 추가적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다. 본 연구 결과

는 저공해 사업 시행의 타당성 평가뿐만 아니라 향후 시행될 보다 효율적인 대기질 개선 정책 연구에 중요한 기초 자료가 될 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 학술진흥재단의 일부 지원을 받아 수행되었습니다 (KRF-2008-331-C00285).

참고 문헌

- 서울시, 2010, 서울특별시 대기질 평가 보고서.
 환경부, 2008, 대기환경연보 (2007).
 Kulkarni, P., Paul, A., Baron, Klaus Willeke, 1993, Aerosol Measurement, 1st ed., John Wiley & Sons Inc.
 SenStadt, 1995, Luftreinhalteplan Berlin 1994 bis 2000 (Air pollution management plan 1994-2000), Brochure No. 19 in the Air Quality Management Series, Department of Urban Development Environmental Protection and Technology, Berlin, Germany.
 Seinfeld, J. H., Pandis, S. N., 1997, Atmospheric Chemistry and Physics, 1st ed., John Wiley & Sons Inc., New York, 97-106.
 Lenschow, P., Abraham, H.-J., Kutzner, K., Lutz, M., Preuß, J.-D., Reichenbacher, W., 2001, Some ideas about the sources of PM₁₀, Atmos. Env., 35, 23-33.