

장기간 대기오염 및 기상자료를 이용한 유효강수세정 기여율 회귀모델의 개발 및 유효성 검사

Development and Validation Test of Effective Wet Scavenging Contribution Regression Models Using Long-term Air Monitoring and Weather Database

임 득 용 · 이 태 정 · 김 동 술*
경희대학교 환경학 및 환경공학과

(2013년 3월 4일 접수, 2013년 4월 22일 수정, 2013년 4월 29일 채택)

Deukyong Lim, Tae-Jung Lee and Dong-Sool Kim*
*Department of Environmental Science and Engineering,
College of Engineering, Kyung Hee University*

(Received 4 March 2013, revised 22 April 2013, accepted 29 April 2013)

Abstract

This study used long-term air and weather data from 2000 to 2009 as raw data sets to develop regression models in order to estimate precipitation scavenging contributions of ambient PM_{10} and NO_2 in Korea. The data were initially analyzed to calculate scavenging ratio (SR), defined as the removal efficiency for PM_{10} and NO_2 by actual precipitation. Next, the effective scavenging contributions (ESC) with considering precipitation probability density were calculated for each sector of precipitation range. Finally, the empirical regression equations for the two air pollutants were separately developed, and then the equations were applied to test the model validity with the raw data sets of 2010 and 2011, which were not involved in the modeling process. The results showed that the predicted PM_{10} ESC by the model was 23.8% and the observed PM_{10} ESCs were 23.6% in 2010 and 24.0% in 2011, respectively. As for NO_2 , the predicted ESC by the model was 16.3% and the observed ESCs were 16.4% in 2010 and 16.6% in 2011, respectively. Thus the developed regression models fitted quite well the actual scavenging contribution for both ambient PM_{10} and NO_2 . The models can then be used as a good tool to quantitatively apportion the natural and anthropogenic sink contribution in Korea. However, to apply the models for far future, the precipitation probability density function (PPDF) as a weather variable in the model equations must be renewed periodically to increase prediction accuracy and reliability. Further, in order to apply the models in a specific local area, it is recommended that the long-term oriented local PPDF should be inserted in the models.

Key words : Effective scavenging contribution (ESC), Scavenging regression model, PM_{10} , NO_2

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)31-201-2430, E-mail : atmos@khu.ac.kr

1. 서 론

최근 수십년간 전세계적으로 인구증가와 산업발전으로 대기질이 악화되고 있으며 인간의 건강까지 위협하고 있다. 우리나라는 대기질 관리를 위하여 저황유 공급 및 청정연료 사용을 의무화하는 연료규제, 배출허용기준 강화, 자동차 저공해사업 추진 등을 적극적으로 추진하고 있으며 수도권지역의 SO₂와 CO의 오염도는 크게 개선되고 있다. 그럼에도 선진국형 대기오염물질로 불리는 PM₁₀, NO₂, O₃ 등의 오염도는 심각한 수준이며, 선진국과 비교하여 PM₁₀ 농도의 경우 약 1.8~3.5배, NO₂의 경우 약 1.7배 높게 조사되고 있으며, 특히 미세분진을 원인물질로 하는 시정장애로 수도권지역의 평균 가시거리는 약 11 km에 불과하다(MOE, 2012). 이에 환경부에서는 수도권지역의 대기환경을 선진국수준으로 개선하고자 2003년 12월 「수도권 대기환경개선에 관한 특별법」을 제정하고 2005년 1월부터 시행하고 있다.

그러나 다양한 대기관리개선을 위한 정책의 시행에도 불구하고, 최근 들어 PM₁₀의 경우에서 소폭의 감소가 관찰되었을 뿐 NO₂와 O₃ 등에서는 각종 산업활동 및 차량의 증가로 아직까지 눈에 띄는 성과가 나타나지 않고 있으며, 단기 환경기준을 초과하는 사례가 꾸준히 발생하고 있다(MOE, 2012; Choi *et al.*, 2010; Shin *et al.*, 2007). 이러한 현상은 2차오염물질의 경우 1차오염물질과는 달리 대기 중의 생성 및 소멸과정들이 복잡·다양하여, 오염배출량 저감과 대기 중 농도감소 사이에 단순한 선형 상관성을 기대할 수 없기 때문이다. 따라서 대기오염물질의 물리화학적 생성 및 소멸과 관련하여, 기상인자들을 포함한 각종 환경요인에 의한 대기 중 오염변동현황을 우선적으로 파악할 필요가 있다. 이와 관련하여 다수의 국내의 논문들은 여름철 대기질 개선이 강수에 의한 세정과 관련이 있음을 정성적으로 밝히고 있으나(Yang *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2007; Lee and Kang, 2001), 실제 대기 중 여러 기상인자와 대기오염물질의 소멸과의 관계를 정량적으로 밝힌 사례는 거의 없다. 이에 Lim *et al.* (2012)은 본 연구에 앞서 PM₁₀과 NO₂의 강수에 의한 세정기여율과 바람에 의한 분산기여율의 정량적 추정에 관한 연구를 수행한 바 있다. 그 결과에 따르면 인위적 저감노

력과 별개로 강수빈도를 고려한 강수에 의해 대기 중 PM₁₀과 NO₂는 각각 23.8%, 16.3%, 바람에 의해서 각각 14.9%, 1.0%만큼 소멸됨을 확인하였다.

본 연구에서는 선행연구에서 얻은 결과를 이용하여, PM₁₀과 NO₂의 강수에 의한 세정기여율을 공식화하여 모사하고자 하였으며, 모사된 모형의 유효성을 검사하고자 하였다. 이를 통해 대기오염물질의 자연적 소멸영향을 정량적으로 추정할 수 있으며, 나아가 인위적 대기질 개선노력의 성과 역시 정량적으로 파악할 수 있을 것으로 기대한다.

2. 분석자료 및 방법

2.1 분석자료의 구조

환경부는 도시 대기질 관리를 위하여 전국적으로 대기오염 자동측정망을 설치하고 주요 대기오염물질을 상시 측정하고 있으며, PM₁₀의 경우 1시간, SO₂, CO, NO₂, O₃의 경우 5분 간격으로 측정하고 있다. 도시대기측정망 운영현황은 2011년 12월말 기준으로 전국 79개 시·군의 총 249개 지점에서 대기환경기준 물질들을 상시 측정하고 있다. 여기서 양산된 자료는 주요 대기오염물질에 대한 농도변화를 파악하고 환경기준달성여부 등을 판단하는 기초자료로 활용되고 있다(MOE, 2011). 뿐만 아니라 대기질 관리 대책 시행에 따른 효과를 분석하고 미래의 대기관리 정책 수립에도 이용되고 있다.

본 연구에서 연구대상 오염물질 항목은 PM₁₀과 NO₂로, PM₁₀의 경우 2000년 1월부터 2009년 12월 까지 10년간 각 지점에서 1시간 단위로 측정된 농도 자료를 이용하였으며, NO₂의 경우 5분마다 자동측정되어 시간단위로 평균된 자료를 이용하였다. 연구대상지역은 전체 도시대기측정망 중 기상청이 운영하는 20개 지상기상관측소와 중복되는 지역으로, 서울 27개 지점, 수원 6개 지점 등 총 120개 지점의 측정 자료를 활용하였다. 대기측정망에서 PM₁₀은 베타선 흡수법(β -ray absorption method), NO₂는 화학발광법(Chemiluminescent method)으로 측정되었다. 일강수량 자료는 20곳의 지상기상관측지점에서 측정된 자료를 활용하였다. 본 연구에서 이용된 총 기상 및 오염자료의 수는 약 16백만 개이다. 기상자료는 기상청에서 제공하는 기상월보를 활용하였으며, 하루 강수

Table 1. The statistical summaries obtained from a preliminary study using PM₁₀ and NO₂ data collected at 120 monitoring stations in Korea. The data observed during Asian dust events were included in the whole analyzed data set.

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	Total	
PM ₁₀ (µg/m ³)	N	499,160	633,336	684,982	786,240	855,755	877,581	939,736	970,463	994,432	997,563	8,239,248
	(%)	(47.4)	(60.1)	(65.0)	(74.6)	(81.2)	(83.3)	(89.2)	(92.1)	(94.3)	(94.6)	(78.3)
	Max.	1,047	1,388	2,946	656	838	883	2,513	2,718	1,758	1,468	2,946
	Min.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Mean	59.1	60.5	65.0	57.1	58.4	56.4	58.0	57.3	54.2	52.4	57.4
	Std.	46.2	52.7	80.9	41.1	38.8	38.4	56.8	54.4	40.8	39.1	49.7
NO ₂ (ppb)	N	694,590	657,760	721,766	810,464	878,460	896,998	948,255	981,374	1,003,034	1,006,508	8,599,209
	(%)	(65.9)	(62.4)	(68.5)	(76.9)	(83.3)	(85.1)	(90.0)	(93.1)	(95.2)	(95.5)	(81.7)
	Max.	234	228	232	204	193	196	345	206	172	386	386
	Min.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Mean	27.1	29.3	27.4	27.3	27.4	25.2	26.0	26.3	26.5	25.9	26.7
	Std.	17.7	18.2	17.6	18.2	17.3	16.3	16.8	17.7	17.6	17.2	17.5

(%): percent of significant data

량이 0.1 mm 이상인 경우를 강수일로 간주하였고 기타 시간별 강수량도나 지속시간 등에 대한 분석은 연구내용에 포함하지 않았다.

2. 2 자료의 통계적 분석

자료분석을 수행하기 이전에 신뢰성 제고를 위하여 모든 자료에 대하여 측정기간의 75% 이상 자료가 확보된 경우에만 유효자료로 인정하였다. 표 1은 120개 대기오염 자동측정망에서 입수한 시간단위별 PM₁₀ 및 NO₂ 각각의 원자료에 대한 연도별 자료의 수, 자료확보율, 평균농도 등을 제시한 것이다. 원자료(raw data)의 확보율은 지속적인 측정망 개설로 2000년도 초반과 비교하여 후반부로 갈수록 증가하여 2009년에는 PM₁₀과 NO₂ 각각의 확보율이 94.6%와 95.5%에 달하였다.

PM₁₀의 경우, 전체 연구기간 중 서울지역에서 최고 농도 사례가 발생하였고(2002년 4월 8일 2,946 µg/m³), 그 외에도 1,000 µg/m³ 이상의 고농도사례는 2003~2005년을 제외하고 봄철에 주로 나타났는데, 이는 중국으로부터 다량의 황사가 유입되었기 때문이다. NO₂는 자동차 등록대수와 통행량이 특히 많은 서울지역에서 최대농도를 보였고, 인천과 경기지역을 포함하는 수도권 지역에서 주로 고농도로 분포하였다. 전반적으로 수도권에서의 오염도는 뚜렷한 증감보다는 일정한 수준을 유지하는 안정된 양상을 보였지만, 상대적으로 인구밀도가 낮고 도시화가 덜 진행된 비도시 지역에서는 지속적으로 20 ppb 이하의 낮은 농도

Table 2. Summaries of annual precipitation, numbers of rainy days, and annual PM₁₀ and NO₂ concentrations during 2000~2009, where Asian dust events were included.

Year	Precipitation (mm/year)			No. of days	PM ₁₀ (µg/m ³)	NO ₂ (ppb)
	Mean	Max.	S.D			
2000	1,294	1,757	236	111	59.1	27.1
2001	1,062	1,782	232	103	60.5	29.3
2002	1,435	2,085	275	114	65.0	27.4
2003	1,866	2,328	230	129	57.1	27.3
2004	1,453	2,018	156	111	58.4	27.4
2005	1,285	1,656	215	114	56.4	25.2
2006	1,400	1,772	198	115	58.0	26.0
2007	1,432	2,167	310	125	57.3	26.3
2008	1,092	1,661	213	107	54.2	26.5
2009	1,295	2,007	307	111	52.4	25.9

로 분포하였다.

우리나라의 연간 총강수량 현황과 강수일수는 표 2와 같다. 이때 연도별 평균 강수량은 20개의 지상기상관측지점의 연간 총강수량을 평균한 값을 의미하며, 강수 발생일수 역시 20개 관측지점 각각의 연간 총강수일을 평균하는 방법으로 산출하였다. 2000년부터 2009년까지의 10년간 평균 강수발생일수는 연중 114일로, 지역별로는 대구광역시 평균 95일로 가장 적었고 제주가 135일로 가장 빈번하여 지리적 인 조건에 따라 기상변화에도 뚜렷한 차이가 있었다.

연간 총강수량의 경향은 뚜렷이 증감하는 특징은 관찰되지 않았으며, 연간 강수일수의 경우도 마찬가지로

지였다. 총강수량은 2003년에 1,865.8mm로 가장 많았고 이후 증감이 반복되었으며, 강수일수 역시 강수량이 가장 많았던 2003년도에 총 129일을 보였으며 전 지역에서 가장 빈번한 강수사례가 있었다. 대체로 강수일수의 증가는 강수량의 증가를 초래했으며, 모든 측정지점에서 강수량에 따라 오염물질의 농도가 낮게 나타나는 경향이 있었다. 한편, González and Ariztizábal (2012)은 강수량보다는 빙도수가 대기오염도 저감에 더욱 중요한 역할을 한다고 보고한 바 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 강수에 의한 오염물질의 농도변화

우리나라의 경우, 기상백과사전에 의하면 기상연보에 사용되는 강수일(수)은 강수량이 0.1 mm 이상인 날수이며 강수량은 00시부터 24시까지 하룻동안 누적된 값을 의미한다(KMA, 2012). 반면 미국의 해양 대기관리처는 0.01 inch 또는 0.2 mm 이상인 날수를 강수일로 정의하고 있다(NOAA, 2012).

강수에 의한 대기 중 분진의 세정은 입자의 생성과 소멸 사이의 균형을 유지하기 위한 주요 메커니즘의 하나로, 입자가 구름응축핵 (cloud condensation nuclei, CCN)으로 작용하는 rainout (in-cloud)이나 강수 시 입자가 빗방울에 의해 운반되는 washout (below-cloud) 과정 중 일어난다고 알려져 있다(Chate *et al.*, 2003). 본 연구에서 정의한 강수의 세정율(SR: scavenging

ratio)이라는 개념은 주로 비나 눈 등 습윤기상입자 (hydrometeors)에 의해 오염물질이 제거되는 정도를 의미한다(Hicks, 2005; Granat *et al.*, 2002).

황사발생일을 제외하고 2000년부터 2009년까지 10년 동안의 월평균 강수량과 대기 중 PM₁₀ 및 NO₂의 농도를 그림 1에 나타내었다. 우리나라의 강수는 대략 6월과 9월 사이에 집중되며, 특히 장마철인 6월 말부터 8월까지 월평균 강수량은 7월에 350mm로 최대였고 8월이 288 mm이었다. PM₁₀의 월평균 농도는, 황사발생일의 자료를 제외했음에도 불구하고, 황사의 잔재영향으로 3, 4월에 각각 63.3 μg/m³와 63.9 μg/m³로 최대를 보였으며 여름철에 최저농도(8월 평균 36.7 μg/m³)를 보였다. NO₂의 월평균 분포 역시 매우 유사한 경향을 보였는데, PM₁₀과 달리 봄철의 피크는 보이지 않았으나 여름철에 연중 가장 낮은 농도분포(8월 15.9 ppb)를 보였으며 가을철부터 겨울철까지 지속적으로 상승하였다. 이러한 두 오염물질의 계절적 거동은 오염발생원의 계절적 배출특성에도 불구하고, 여름철 동안 강수에 의해 일시적으로 대기질이 개선되는 효과를 확실히 보여준다. 이에 대한 보다 구체적인 기상인자의 영향을 확인하고자 강수량에 따른 PM₁₀과 NO₂ 농도의 변화를 조사하였다.

대기오염 자동측정망 120개 지점에서 황사가 관측된 일의 자료를 제외한 PM₁₀과 NO₂ 농도자료를 이용하면서, 2000년부터 2009년까지 비강수일의 평균농도 대비 누적강수량에 따른 농도감소의 비를 산출하였고, 이를 강수에 의한 세정율(SR)로 정의한 바 있

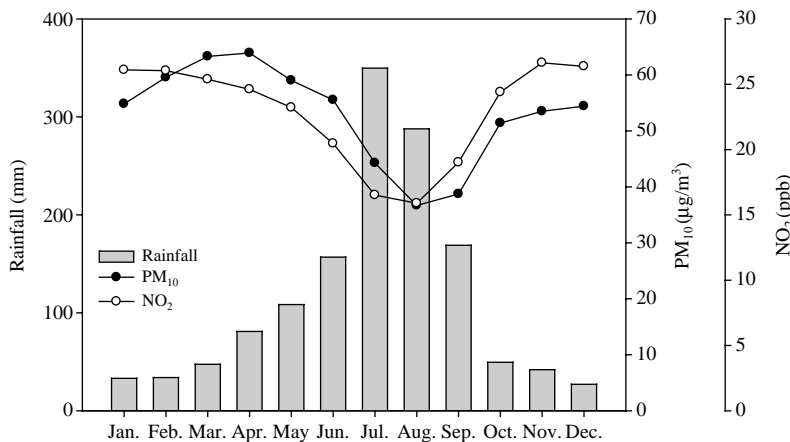


Fig. 1. Monthly variation of average rainfalls and pollutants' concentrations in Korea, 2000~2009.

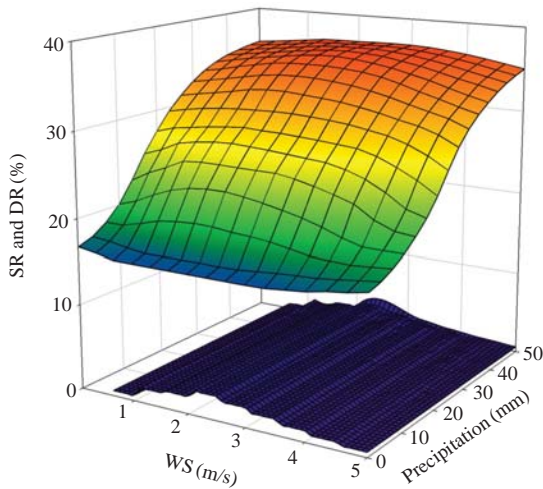


Fig. 2. Comparison of SR (%) by precipitation and DR (%) by wind speed.

다(Lim *et al.*, 2012).

2000년부터 2009년까지 10년 동안 비강수시 PM₁₀의 전국 평균농도는 47.9 μg/m³로 강수시의 평균농도인 36.5 μg/m³보다 10 μg/m³ 이상 높았다. 하루 강수량이 많을수록 PM₁₀ 농도는 꾸준히 감소하였으며, 이에 따라 세정율(SR)은 점차 증가하는 추세를 보였다. 또한 일강수량이 100 mm 이상 누적되었을 때의 SR이 52%로 가장 높아 강수의 강도와 SR은 상호 밀접한 관련이 있음을 알 수 있었다.

NO₂의 경우, 비강수시의 평균농도는 20.1 ppb로 강수시의 평균농도인 16.8 ppb와 그 저감율의 차이가 PM₁₀ 보다는 훨씬 작아 강수에 의한 대기오염물질의 세정효과는 가스상물질 보다는 입자상 물질에서 더욱 뚜렷하였다. PM₁₀의 경우와 마찬가지로 NO₂ 역시 일별 강수량이 증가할수록 대기 중 농도가 점차 감소하여 SR은 꾸준히 증가하였고, 100 mm 이상의 강수량이 기록되었을 때 가장 큰 SR(32.6%)을 얻었다. 이와 같이 강수량에 의한 두 오염물질의 농도저감은 각각 유의수준 α=0.05로 유의한 관계가 있었다. 이는 대기오염물질의 세정은 강수량에 의해 좌우되며 강수량과 강수의 강도가 클수록 세정과 흡수효과가 커지기 때문에 사료된다(Ruijgrok *et al.*, 1992; Engelmann, 1970).

대기오염물질의 농도분포는 기온, 풍속, 강수량, 혼합고, 기압 등 기상인자들에 의한 대기 중 수송 및

확산과정을 통하여 그 패턴에 다양한 변화를 보이게 된다. 본 연구에서는 대기오염농도에 영향을 미치는 기상요소 중 강수량에 의한 저감효과만을 고려하였으며 그 이유는 다음과 같다. 선행연구의 결과로부터 PM₁₀ 농도에 대한 강수량 분포에 따른 세정율(SR, %)과 풍속 분포에 따른 분산율(DR: dispersion ratio, %)을 그림 2에 제시하였다. 그림에서 보는 것처럼 강수에 의한 PM₁₀의 저감율에 비하여 풍속에 의한 분산율은 그 효과가 매우 미미함을 알 수 있다. 이러한 이유로 대기 중 오염물질의 감소에 관여하는 여러 기상요소들 중 강수에 의한 영향이 가장 두드러진다고 판단하여 강수량을 제외한 기상요소들에 의한 영향은 고려하지 않았다. 따라서 본 연구에서 사용한 '세정효율'이라는 용어는 다른 기상요소들은 배제한 강수에 의한 영향만을 고려한 대기오염물질의 저감율로 정의할 수 있다.

3. 2 강수량에 따른 세정기여도 추정

강수의 세정 및 흡수효과로 인한 대기 중 오염물질의 유효세정기여율(ESC: effective scavenging contribution)을 정량적으로 산출하기 위하여, 우선 각 강수구간별 발생빈도를 조사하였다. 이때 강수량별 평균세정율을 함께 고려하였으며, 통상적인 기상조건 하에서의 세정효과를 평가하기 위하여 황사 등의 특이사례는 분석에서 제외하였다.

오염물질별 강수에 의한 ESC를 통계적으로 추정하기 위하여 앞의 3.1절에서 얻은 세정율에 구간별 강수확률밀도를 곱하여 합산한 값으로 선행논문(Lim *et al.*, 2012)에서 정의하였으며, 이를 도식화하여 그림 3에 나타내었다.

도표를 도식하는 과정에서, 우선 x축을 상용대수 스케일로 변환하였으며, 강수량 간격 1~10 mm 구간(sector 1~10)에서는 강수량과 빈도수를 1 mm 간격으로 조사하였다. 또한 10 mm 초과시(sector 11~20)에는 10 mm 간격으로 누적된 강수량과 빈도수를 조사하였기 때문에, 10 mm 초과 구간에 대해서는 0.1을 곱하여 1 mm 간격으로 y축 값(세정기여율)을 계산한 후 도식하였다. 황사발생일을 제외한 우리나라 전역에서 강수에 의한 ESC는 PM₁₀이 23.8%이었으며, NO₂는 16.3%로 계산되어 가스상물질보다 입자상물질의 세정효과가 더 큼을 재확인 할 수 있었다. 이러한 내용은 Lim *et al.* (2002, 2012)의 선행연구에서도

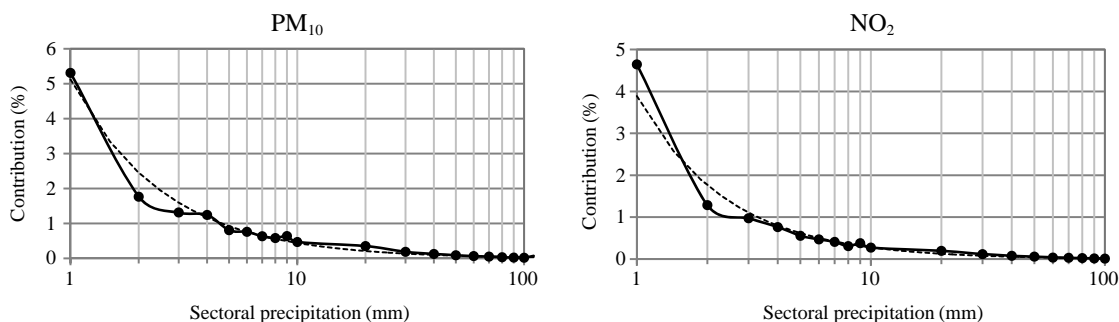


Fig. 3. Effective scavenging contributions for PM₁₀ and NO₂ in Korea (A dot line represents the best fit for each pollutant).

확인되었다.

강수구간별 세정기여율은 강수량만을 고려하여 산출한 세정율의 분포도와는 매우 다른 양상을 보였다. 이는 강수량이 크게 증가할 경우 해당 강수구간의 발생빈도확률이 빠르게 감소하기 때문이다. 즉, 강수 1회 발생시 누적강수량이 증가할수록 세정율은 증가하나 그에 따른 세정기여율은 감소하기 때문이다. 이에 따라 강수량이 1mm 이하인 구간의 PM₁₀과 NO₂의 세정기여율은 각각 5.3%와 4.6%를 보여 모든 강수구간 중 최대 세정기여율을 보였다. 이러한 결과는 구간별 강수확률밀도의 차이 때문이며, Koester and Hites (1992)의 강수에 의한 대기 중 오염물질의 세정은 초기강수에 의해 더 높은 효율을 보인다는 내용과도 일치하였다.

3.3 다중회귀분석을 이용한 세정기여율 추정모형의 설계 및 유효성 검토

우리나라 기상현황에 가장 적합한 대기오염물질의 강수세정식을 개발하기 위하여, 2000년부터 2009년까지 총 10년간 전국의 120개 자동측정소 자료와 강수량 자료를 모두 이용하였다. 본 연구에서는 MS Office Excel 2010을 이용한 회귀분석(regression analysis)을 수행하였으며, 추정율을 높이기 위해 강수량과 함께 강수의 빈도확률을 동시에 고려하였다. 이 때 강수 구간(sector)별 발생빈도확률은 전국의 빈도확률을 이용하였다. 회귀분석을 수행한 결과, 다음과 같은 PM₁₀과 NO₂의 세정공식을 얻을 수 있었다.

PM₁₀에 대하여,

$$[ESC]_P = 0.0003 [X_1] + 0.163 [X_2] + 0.3660 \quad (1)$$

NO₂에 대하여,

$$[ESC]_N = 0.0015 [X_1] + 0.141 [X_2] + 0.0562 \quad (2)$$

여기서, [ESC]_P 및 [ESC]_N은 각각 PM₁₀과 NO₂에 대하여 예상되는 유효세정기여율(%)을 나타내며, [X₁]과 [X₂]는 각각 구간별 강수량과 강수의 발생빈도율(%)을 나타낸다. PM₁₀과 NO₂의 결정계수(R²)는 각각 0.9171과 0.9884이었으며, 결정계수는 보통 1~0 사이의 값을 가지게 되는데 결정계수의 값이 클수록 회귀식의 설명력이 높다(Kim *et al.*, 2007). 이 세정공식은 과거 10년에 걸친 우리나라 전 지역의 방대한 자료(big data)를 이용하여 개발되었으므로, 다소의 오차발생 가능성에도 불구하고 실 적용 시 충분한 응용성이 있다고 사료된다.

각 오염물질에 대하여 도출된 회귀식을 검증하기 위하여 2010년과 2011년 자료를 각 변수 [X₁]과 [X₂]에 대입하여 그 결과를 비교해 보았다. 평가에 앞서, 2010년과 2011년 자료 역시 동일한 방법으로 강수의 구간별 유효세정기여율을 계산하였다. 본 세정공식의 적용에 있어서는 식(1)과 (2)에서 [X₂]에 해당하는 강수량별 발생빈도(δ)는 항상 변할 수 있는 통계치이므로, 표 4와 같이 매년 새로운 강수량 자료가 누적되어 평균한 δ을 이용하여야 세정기여율의 추정력을 극대화 할 수 있다. 이 점을 고려하면서, 2000년부터 2011년까지 세정공식을 이용하여 PM₁₀과 NO₂에 대하여 계산한 연도별 ESC 값과 2010년 및 2011년에 대하여 ESC 값을 각각 추정하여 비교하였다. 이때 세정율(SR)을 산정하는 과정에서, 수식의 분모에 해당하는 비강수일 평균농도의 계산과정에 주의할 필요가 있다. 본 연구에서는 누적기간을 고려하여

Table 3. Mean concentrations, scavenging ratios (SR), individual scavenging contributions (SC), and effective scavenging contributions (ESC) for PM₁₀ and NO₂ based on accumulated daily precipitation amount in Korea.

Sector: j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Total or ESC ⁶⁾	
Prec. (mm)	P ¹⁾ ≤1	1<P≤2	2<P≤3	3<P≤4	4<P≤5	5<P≤6	6<P≤7	7<P≤8	8<P≤9	9<P≤10	10<P≤20	20<P≤30	30<P≤40	40<P≤50	50<P≤60	60<P≤70	70<P≤80	80<P≤90	90<P≤100	100<P		
N (days) ²⁾	7,447	2,145	1,435	1,125	903	728	655	532	480	411	2,766	1,319	794	508	354	251	162	123	98	313	22,549	
δ ³⁾	33.0	9.5	6.4	5.0	4.0	3.2	2.9	2.4	2.1	1.8	12.3	5.8	3.5	2.3	1.6	1.1	0.7	0.5	0.4	1.4	100	
PM ₁₀ (μg/m ³)																						
Mean	40.2	39.0	38.0	35.9	38.2	36.6	37.4	36.0	33.5	35.5	34.1	32.4	30.5	29.0	28.0	25.5	26.0	25.4	25.9	23.0	—	—
SR ⁴⁾	16.1	18.6	20.6	24.9	20.1	23.5	21.9	24.8	30.0	25.8	28.9	32.3	36.4	39.4	41.6	46.8	45.7	47.0	45.9	52.0	—	—
SC ⁵⁾	5.3	1.8	1.3	1.2	0.8	0.8	0.6	0.6	0.6	0.5	3.5	1.9	1.3	0.9	0.7	0.5	0.3	0.3	0.2	0.7	23.8	—
NO ₂ (ppb)																						
Mean	17.3	17.4	17.0	17.0	17.3	17.2	17.3	17.5	16.5	17.1	16.9	16.0	15.5	15.0	15.5	14.1	13.7	14.2	14.4	13.6	—	—
SR	14.1	13.5	15.3	15.3	13.9	14.6	14.1	13.1	17.8	15.1	16.1	20.2	22.9	25.7	23.1	29.8	31.8	29.3	28.6	32.6	—	—
SC	4.6	1.3	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3	0.4	0.3	2.0	1.2	0.8	0.6	0.4	0.3	0.2	0.2	0.1	0.5	16.3	—

Note: ¹⁾Precipitation

²⁾N (days): total number of rainy days during 2000~2009 in 20 cities of Korea

³⁾δ: precipitation probability for jth sector

⁴⁾SR: scavenging ratio(%) for each sector

⁵⁾SC: scavenging contribution(%) for each sector

⁶⁾ESC: effective scavenging contribution(%)

Table 4. Distribution of probability density (δ) for each sector of accumulated precipitation amount in Korea.

Period	≤1	≤2	≤3	≤4	≤5	≤6	≤7	≤8	≤9	≤10	≤20	≤30	≤40	≤50	≤60	≤70	≤80	≤90	≤100	100<P	
	P ¹⁾ ≤1	1<P≤2	2<P≤3	3<P≤4	4<P≤5	5<P≤6	6<P≤7	7<P≤8	8<P≤9	9<P≤10	10<P≤20	20<P≤30	30<P≤40	40<P≤50	50<P≤60	60<P≤70	70<P≤80	80<P≤90	90<P≤100	100<P	
2000~2009	33.0	9.5	6.4	5.0	4.0	3.2	2.9	2.4	2.1	1.8	12.3	5.8	3.5	2.3	1.6	1.1	0.7	0.5	0.4	1.4	—
2000~2010	32.8	9.6	6.4	5.0	4.0	3.2	3.0	2.5	2.2	1.8	12.3	5.8	3.5	2.2	1.6	1.1	0.7	0.5	0.4	1.3	—
2000~2011	32.7	9.5	6.4	5.0	4.0	3.2	2.9	2.4	2.2	1.8	12.3	5.8	3.6	2.3	1.6	1.2	0.8	0.6	0.4	1.4	—

Note: ¹⁾Precipitation

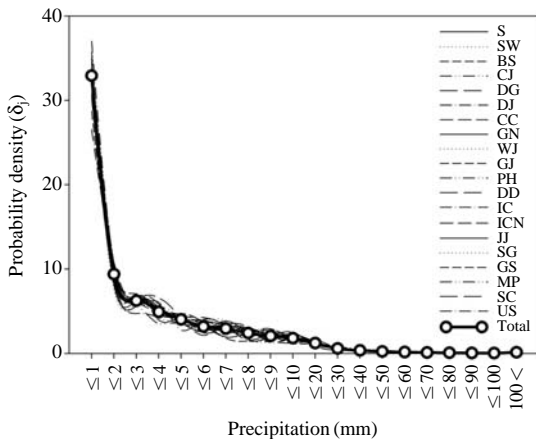


Fig. 4. Distribution of probability density (δ) for each sector of accumulated precipitation amount obtained from 20 cities in Korea (S: Seoul, SW: Suwon, BS: Busan, CJ: Cheongju, DG: Daegu, DJ: Daejeon, CC: Chuncheon, GN: Gangneung, WJ: Wonju, GJ: Gwangju, PH: Pohang, DD: Dongducheon, IC: Icheon, ICN: Incheon, JJ: Jeju, SG: Seogwipo, GS: Gunsan, MP: Mokpo, SC: Suncheon, US: Ulsan, Total: total mean).

2010년도 ESC의 경우, 2000년부터 2010년까지의 비강수일 평균농도를 사용하였으며, 2011년의 경우에는 2000년부터 2011년까지의 비강수일 평균농도를 각각 이용하였다. 이는 장기간 농도평균 자료를 이용하여 기후변화로 인해 야기될 수 있는 단기 농도변동의 효과를 줄이기 위함이다.

개발된 수식 (1)을 이용한 2000년부터 2009년까지의 $[ESC]_p$ 평균값은 23.8%으로, 2010년의 $[ESC]_p$ (23.6%)과 2011년의 $[ESC]_p$ (24.0%)와 매우 근사한 결과를 얻었다. 또한 NO_2 역시 세정모델을 이용하여 예측된 ESC (16.3%)가 2010년 (16.4%)과 2011년 (16.6%)의 계산값과 비교하여 잘 묘사된 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 제시한 세정모델을 시간 변화에 따른 강수발생빈도를 고려할 경우, 본 세정공식은 우리나라 전역에 대한 평균 세정기여율 추정에 충분히 활용 가능한 것으로 판단된다.

그림 4는 지상기상관측이 시행되고 있는 전국 20개 지역에서의 강수량별 발생빈도(δ) 분포를 제시한 것으로, 앞서 그림 3을 도식할 때와 동일하게 x축을 상용대수 스케일로 변환하였고, 누적강수 10mm 초과 구간에 대해서는 0.1을 곱하여 y축 값(δ)으로 하

였다. 그 결과, 누적강수 10mm 이하에서는 지역별로 다소 편차를 보이기도 했으나 강수량의 변화에 따른 분포는 모든 지역에서 매우 유사한 경향을 보였다. 따라서 본 연구에서 설계한 세정공식의 적용에 있어서, 두 개의 변수 중 하나인 δ 는 지역별 고유값을 적용하였을 경우와 우리나라 전국의 120개 자동측정망 자료의 평균값을 적용하였을 경우를 비교할 때 추정된 ESC 결과치는 커다란 차이를 보이지 않을 것으로 판단된다.

이 결과를 확인하기 위하여, 지상기상관측이 시행되고 있는 전국 20개 지역(local cities)의 지역별 δ 와 우리나라 전역(지상기상관측지점과 대기오염측정망이 함께 운영되는 지점)의 평균 δ 를 각각 세정공식에 대입하여 적용하였다. 그림 5는 전국의 20개 지점에서 각 오염물질에 대한 ESC를 나타낸 것으로, 기본 세정식을 이용하여 2000년부터 2009년까지 PM_{10} 과 NO_2 에 대한 각 지역의 ESC를 계산하여 제시한 것이다. PM_{10} 과 NO_2 의 전국 평균 ESC는 각각 23.8%와 16.3%로, 그림에서 보는 바와 같이 ESC는 지역별로 매우 상이한 분포를 보였으며 지역별 편차는 PM_{10} 보다 NO_2 가 크게 나타났다. PM_{10} 의 경우, 부산, 대구, 강릉, 포항, 인천, 군산, 순천에서, 그리고 NO_2 는 부산, 강릉, 포항, 동두천, 인천, 서귀포, 목포, 순천 등의 지역에서 평균보다 낮은 ESC 분포를 보였다. 전국 평균 ESC보다 낮은 대부분 지역들의 경우, PM_{10} 과 NO_2 각각의 강수시와 비강수시의 평균농도 차이가 다른 지역들에 비하여 크지 않은 공통된 특징을 보였다. 예를 들어 강수와 비강수 시의 NO_2 평균농도는 강릉의 경우 13.1:13.2 ppb, 동두천의 경우 7.2:7.5 ppb, 순천의 경우 15.9:16.3 ppb, 포항의 경우 23.3:24.9 ppb 등이었다.

또한 이와 같이 지역별 ESC의 차이는 각 지역별 해당 오염물질의 배출량과 배출특성이 다르기 때문으로 판단되며, 또 다른 사유로는 일부지역(강릉, 동두천, 서귀포, 목포, 순천 등)의 경우, 한 개의 대기질 측정소만이 설치운영되고 있어 ESC의 편차와 불확도가 크게 발생한 것으로 사료된다.

위와 같은 적용성 검사를 통하여 본 세정모델은 우리나라의 유효강수세정기여율을 추정하기에 적합한 것으로 판단된다. 단지 모델을 활용할 때 추정 정확도와 신뢰도를 높이기 위해서는 입력자료 δ 를 매년 갱신할 필요가 있다. 또한 우리나라 전역의 평균치를

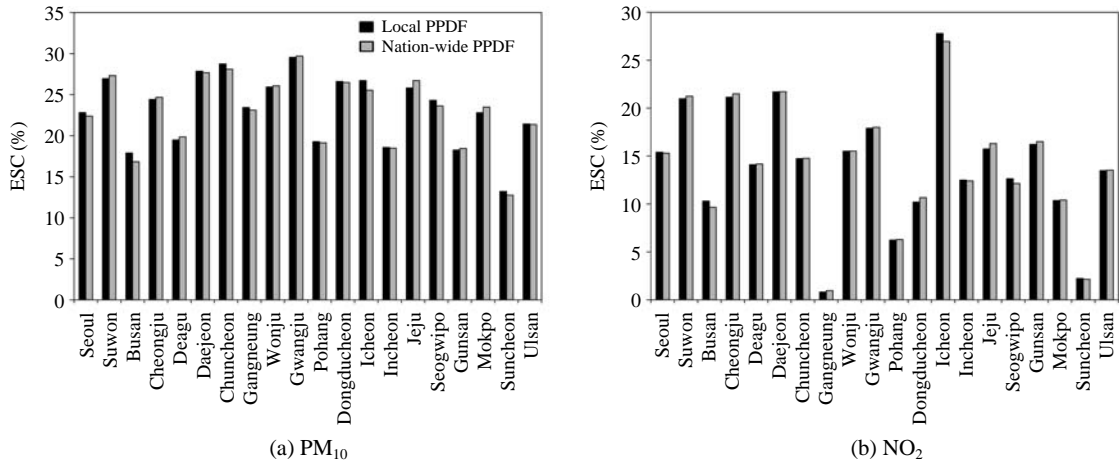


Fig. 5. The effective scavenging contribution (ESC, %) of PM₁₀ and NO₂ for each sector of precipitation amount (mm) during 2000~2009 in 20 local cities of Korea. Each ESC was separately calculated using local average (black bars) and nation-wide average (grey bars) of the corresponding precipitation probability density functions (PPDF).

이용하였기 때문에 비록 검증단계에서 연도별 평균 기여율을 모사하는 데에는 커다란 차이를 보이지 않았으나, 지역별로 세부 모사할 때에는 한계가 있을 수도 있다. 따라서 이러한 문제점을 극복하기 위해서는 장기간 자료에 입각한 지역별 세정모형을 추후 개발할 필요가 있다.

4. 결 론

우리나라의 대기질은 2000년대 초반에 비하여 다소 개선되었으며, 특히 서울, 인천, 경기를 포함하는 수도권지역을 중심으로 2000년대 후반으로 접어들면서 여름철의 농도가 점차 감소하고 있다. PM₁₀의 경우를 예로 들면, 2005년 6, 7, 8월 각각 69.4 μg/m³, 69.0 μg/m³, 49.2 μg/m³에서 2009년에는 54.0 μg/m³, 46.6 μg/m³, 36.9 μg/m³으로 감소하였다. 이와 같은 결과는 강수현상 등의 기상변수가 중요한 요인 중 하나이며, 이중 강수의 세정영향으로 인한 대기오염물질의 농도저감 효과는 가스상 물질인 NO₂보다 입자상 물질인 PM₁₀에서 더욱 뚜렷하게 나타났다. 본 연구에서는 이 세정효과를 통계적으로 모사하여 강수량과 강수빈도에 따른 오염물질의 저감 정도를 정량적으로 추정하고자 하였다.

본 연구에서는 과거 10년 동안(2000~2009년) 전

국의 PM₁₀과 NO₂ 자동측정망 자료와 기상자료를 기반으로, 20개의 강수구간별 유효세정기여율(ESC)을 강수량과 빈도율을 독립변수로 사용하여 강수세정모형을 개발하였다. 또한 개발된 회귀추정식의 적용가능성을 검토하기 위하여 모형개발에 포함되지 않은 이후 연도(2010년과 2011년)의 자료를 활용하여 실제 세정기여율과 모형식으로 추정된 세정기여율을 비교검증하였다. 그 결과 추정 ESC는 PM₁₀의 경우 2010년 23.6%, 2011년 24.0% 이었고, NO₂의 경우 2010년 16.4%와 2011년 16.6%로 나타나, PM₁₀과 NO₂의 실제 ESC인 23.8%와 16.3%와 비교하여 모두 오차범위 ±2%P 이내의 높은 추정 정확도를 확인하였다. 이에 따라 본 세정모형은 우리나라의 평균적인 세정기여율 추정에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 생각된다. 또한 향후 더욱 정밀한 지역별 ESC를 추정하기 위해서는 지역별 강수확률밀도(δ)에 대한 새로운 자료의 갱신이 매년 병행되어야 한다.

참 고 문 헌

Chate, D.M., P.S.P. Rao, M.S. Naik, G.A. Momin, P.D. Safai, and K. Ali (2003) Scavenging of aerosols and their chemical species by rain, Atmospheric Environment, 37, 2477-2484.
 Choi, Y.J., W.S. Kim, and K.J. Ko (2010) Co-effect analysis

- of air quality management measures in Seoul, Seoul Development Institute.
- Engelmann, R.J. (1970) Scavenging prediction using ratios of concentrations in air and precipitation, *Journal of Applied Meteorology*, 10, 493-497.
- González, C.M. and B.H. Aristizábal (2012) Acid rain and particulate matter dynamics in a mid-sized Andean city: The effect of rain intensity on ion scavenging, *Atmospheric Environment*, 60, 164-171.
- Granat, L., M. Norman, C. Leck, U.C. Kulshrestha, and H. Rodhe (2002) Wet scavenging of sulfur compounds and other constituents during the Indian Ocean Experiment (INDOEX), *Journal of Geophysical Research*, 107 D19, 8025.
- Hicks, B.B. (2005) A climatology of wet deposition scavenging ratios for the United States, *Atmospheric Environment*, 39, 1585-1596.
- Kim, H.S., J.B. Huh, P.K. Hopke, T.M. Holsen, and S.M. Yi (2007) Characteristics of the major chemical constituents of PM_{2.5} and smog events in Seoul, Korea in 2003 and 2004, *Atmospheric Environment*, 41, 6762-6770.
- Kim, Y.G., S.Y. Lee, Y.K. Lim, and S.K. Song (2007) Design and assessment of an ozone potential forecasting model using multi-regression equations in Ulsan Metropolitan area, *J. KOSAE*, 23(1), 14-28.
- KMA (2012) Weather Dictionary. Available from URL: <http://www.kma.go.kr/index.jsp>.
- Koester, C.J. and R.A. Hites (1992) Wet and dry deposition of chlorinated dioxins and furan, *Environmental Science and Technology*, 26, 1375-1382.
- Lee, H.S. and B.W. Kang (2001) Chemical characteristics of principal PM_{2.5} species in Chongju, South Korea, *Atmospheric Environment*, 35, 739-746.
- Lim, D.Y., J.S. Heo, and D.S. Kim (2002) Washout removal efficiencies of major air pollutants by precipitation, *J. KOSAE*, 18(E2), 97-106.
- Lim, D.Y., T.J. Lee, and D.S. Kim (2012) Quantitative estimation of precipitation scavenging and wind dispersion contributions for PM₁₀ and NO₂ using long-term air and weather monitoring database during 2000~2009 in Korea, *J. KOSAE*, 28(3), 325-347.
- MOE (2012) Annual Report of Ambient Air Quality in Korea, 2011.
- NOAA (2012) Weather Terminology. Available from URL: <http://www.noaa.gov/>.
- Ruijgrok, W., H. Visser, and F.G. Romer (1992) The scavenging and wet deposition of acidifying components in Arnhem: 1984~1990. In: Schwartz, S.E. and Slinn, W.G.N. (Eds.), *Precipitation Scavenging and Air-Surface Exchange*. Hemisphere Publishing Corp, Washington, DC, 471-482.
- Shin, M.K., C.D. Lee, H.S. Ha, C.S. Choe and Y.H. Kim (2007) The influence of meteorological factors on PM₁₀ Concentration in Incheon, *J. KOSAE*, 23(3), 322-331.
- Yang, F., L. Huang, W. Zhang, K. He, Y. Ma, J.R. Brook, J. Tan, Q. Zhao, and Y. Cheng (2011) Carbonaceous species in PM_{2.5} at a pair of rural/urban sites in Beijing, 2005~2008, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 7893-7903.
- Yang, L., X. Zhou, Z. Wang, Y. Zhou, S. Cheong, P. Xu, X. Gao, W. Nie, X. Wang, and W. Wang (2012) Airborne fine particulate pollution in Jinan, China: concentrations, chemical compositions and influence on visibility impairment, *Atmospheric Environment*, 55, 506-514.