

서울지역 도시대기측정망 평가 연구

An Assessment Study for the Urban Air Monitoring Network in Seoul

김영성* · 최용주 · 박지수 · 김찬혁

한국외국어대학교 환경학과

(2014년 6월 24일 접수, 2014년 7월 15일 수정, 2014년 9월 4일 채택)

Young Sung Ghim*, Yongjoo Choi, Ji Soo Park and Chan Hyuk Kim

Department of Environmental Science, Hankuk University of Foreign Studies

(Received 24 June 2014, revised 15 July 2014, accepted 4 September 2014)

Abstract

Twenty-five stations of the urban monitoring network in Seoul were assessed with a focus on surveillance function of the exceedances of 8-hour ozone and 24-hour PM₁₀ standards. The two standards were selected because their attainment rates were particularly low. Two hierarchical cluster analyses were performed to group stations with similar atmospheric environments-one using daily highest 8-hour [O₃+NO₂], 8-hour O₃ concentrations plus corresponding 8-hour NO₂ concentrations considering the interconversion of O₃ and NO₂, and the other using 24-hour PM₁₀ concentrations. An index to measure higher concentration and exceedances of the standards was introduced. Within a cluster, sufficiently high score was assigned to the trends station or the station with higher index. Scores for O₃+NO₂ and PM₁₀ of a given station were added and ranked in the descending order to determine the relative importance.

Key words : Exceedance surveillance, Cluster analysis, Index and score

1. 서 론

2012년 말 현재 우리나라에는 대기오염 측정을 위하여 11개 측정망에 477개 측정소가 운영되고 있다 (NIER, 2013). 대기오염측정망은 크게 일반측정망과 집중측정망으로 구성되며, 일반측정망은 다시 환경기준물질을 주로 측정하는 일반대기오염측정망과, 유해

물질, 중금속, 광화학오염물질 등을 측정하는 특수대기오염측정망으로 구분된다(KME, 2010). 도시대기측정망은 교외대기, 국가배경, 도로변대기와 함께 일반대기오염측정망에 속하며, 2012년 말 현재 측정소 수는 250개로 전체 측정소 수의 52%이다.

도시대기측정망은 측정망 중 가장 규모가 클 뿐 아니라, 수도권대기환경개선에 관한 특별법(수도권특별법) 기본계획의 목표와 최근의 초미세먼지 논란에서 볼 수 있는 것과 같이 아직 우리 사회의 관심이(유해물질 등 특수대기로 확대되기보다) 주로 환경기준물질에 집중되어 있기 때문에 측정망 자료를 이

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)31-330-4993, E-mail : ysghim@hufs.ac.kr

용한 연구도 대부분 이를 대상으로 하고 있다(Bae *et al.*, 2013; Ghim and Kim, 2013; Kim and Yeo, 2013). 하지만 이용도가 많은 만큼 문제점이 지적되는 것도 주로 도시대기측정망이다. 첫째는, 측정소 수가 적정한지이다. 우리나라는 도시대기측정망을 별도로 구분하고 있지만 나라마다 측정망의 구분과 목적이 달라 직접 비교가 어렵다(KME, 2009). 따라서 우리나라의 일반대기오염측정망과 같이 환경기준물질을 측정하는 측정소 수를 인구당, 면적당으로 비교하면, 대체로 일본보다 적고 미국보다 많으며, 유럽의 국가들 중에서는 많은 편에 속한다(KME, 2014). 즉, 절대적으로 과다하다고 말할 수준은 아니다.

둘째는, 측정소 수의 지속적 증가에 따른 지역 평균의 대표성 문제이다. 사실 이와 같은 문제는 측정소 단위로 환경기준 초과 여부를 감시하는 다른 선진국에서는 보기 어렵다. 하지만 우리나라에서는 그동안 시·도별 평균을 집계하여 왔고 수도권 특별법의 기본 계획에서는 서울, 인천, 경기 등 지역 평균을 목표로 설정하며 법적 의미도 지니게 되었다. 그러나 MAMO(2010)에서는 일정기간 측정이 지속된 측정소 자료만을 이용할 때와(측정소 수 변화에 상관없이 운영 중인 모든 측정소 자료를 집계한) 대기환경연보 자료를 이용할 때 경기도 NO₂ 연평균 변화의 증가, 감소가 달라지는 것을 지적하였다. 이와 같은 문제들로 인하여 2차 기본계획에서는 전체 측정소 자료를 이용하는 대신, 일정기간 위치가 변하지 않은 측정소 중에서 대표측정소를 선정하여 지역 평균을 산출하도록 하였다(KME and MAMO, 2013).

현재의 측정망 설치·운영 지침에서 측정소 폐쇄는 이전을 전제로 할 때 가능하다(KME, 2011). 측정소 수가 증가할 수밖에 없는 중요한 이유의 하나이다. 측정소가 부족할 때는 합당하였으나 앞의 두 사례에서 볼 수 있는 것과 같이 최근에는 측정소의 절대 수와 증가 추세 모두에 대하여 문제가 제기되고 있다. 뿐만 아니라 환경기준물질 중 SO₂, CO는 측정소의 기준 달성률이 99~100%에 이르는 데 비하여(Ghim and Kim, 2013) 유해대기오염물질에 대한 관심도 점차 높아지고 있다(Baek and Jeon, 2013; Kim and Lee, 2013).

이번 연구에서는 서울지역 도시대기측정망 25개 측정소에 대하여 측정소별 환경기준 감시의 유효성을 조사하였다. 주요 환경기준물질 중 SO₂와 CO는

거의 환경기준을 달성하였기 때문에 달성률이 낮은 PM₁₀과 오존의 환경기준을 대상으로 하였다(Ghim and Kim, 2013). PM₁₀과 오존의 환경기준 중에서도 각각 24시간 평균과 8시간 평균의 환경기준 달성률이 특히 낮기 때문에 일평균의 시간 변화를 점검하여 변화가 유사한 측정소를 군집으로 분류하고, 농도와 환경기준 초과를 지수화하여 군집 내 측정소를 평가하였다.

2. 군집분석

2009년부터 2011년까지 3년간 각각 24시간 PM₁₀과 일최고 8시간 [오존+NO₂] 자료를 이용하여 군집을 분류하였다. 군집분석에는 R version 2.15.3 (<http://www.r-project.org/>)의 패키지 중 계층적(hierarchical) 군집분석 방법인 pvclust(Suzuki and Shimodaira, 2006)를 이용하였다. pvclust는 군집분석 결과를 유의확률인 p 값과 함께 제공하기 때문에 유의확률에 따라 군집의 범위를 선택할 수 있다는 장점이 있다.

일최고 8시간 [오존+NO₂]은 일최고 8시간 오존 시간대 오존에 NO₂를 더한 것이다. 오존의 환경기준을 감시하고자 하였음에도 두 물질의 합을 이용한 것은 이들의 생성과 소멸이 호환적이기 때문이다(Song *et al.*, 2012; Seinfeld and Pandis, 1998). 즉, 현재는 NO₂가 높고 오존이 낮더라도 NO₂가 감소하면 오존이 증가할 수 있고 반대로 가능하므로 두 물질의 합으로써 광화학 오염의 잠재성을 평가하였다. 일최고 8시간 자료를 이용한 것은 일최고 8시간의 99백분위 수로써 8시간 평균의 환경기준 초과 여부를 판단하기 때문이다. 하루 중 [오존+NO₂]이 가장 높은 8시간 자료를 이용하는 방안도 검토하였으나 현재 오존의 고농도에 가중치를 주기 위하여 오존이 가장 높은 8시간에 NO₂를 더하였다.

그림 1은 일최고 8시간 [오존+NO₂]을 이용한 군집분석 결과이다. $p < 0.01$ 에서는 2개의 군집이, $p < 0.05$ 에서는 4개의 군집이 가능하였다. 개념적으로 단순화하면 $p < 0.01$ 에서 2개의 군집이 가능하다면 이들의 군집을 부정할 확률이 1% 미만이다(Suzuki and Shimodaira, 2006).

군집 내 측정소는 오염물질 변화의 상관성이 크므로 배출과 이동, 전환 등 대기환경이 유사하다. $p <$

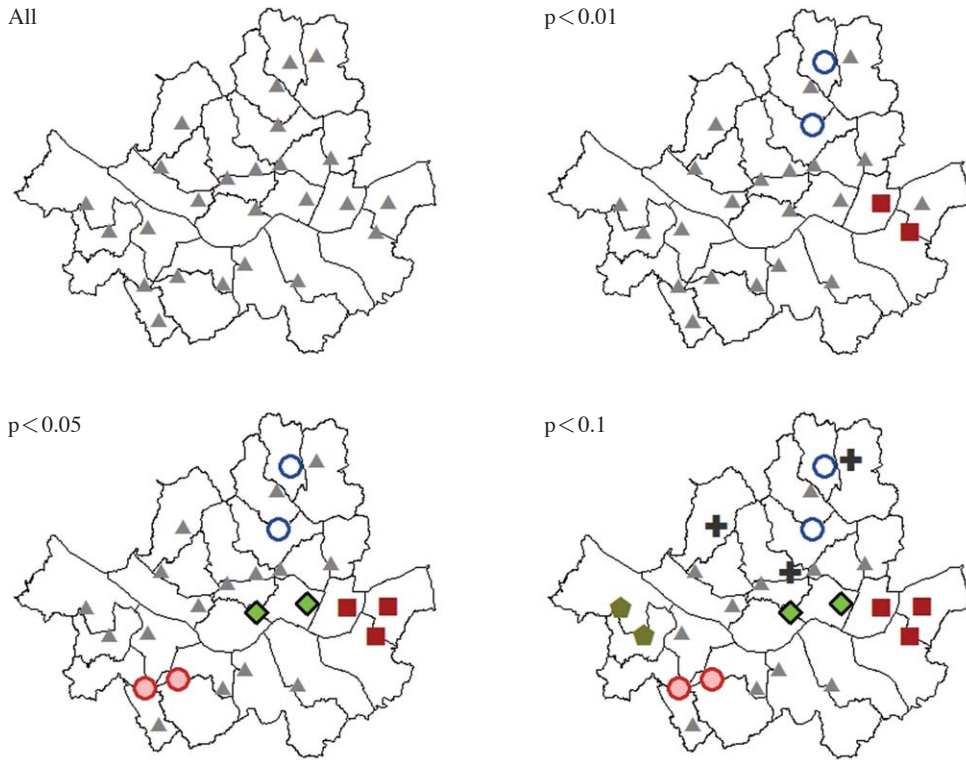


Fig. 1. Grouping of air monitoring stations by cluster analysis using daily highest 8-hour ozone concentrations plus corresponding 8-hour NO₂ concentrations. P-value indicates how strong the cluster is supported by data; the smaller the p-value, the larger the significance of clusters. Symbols in the 'all' panel denote all monitoring stations in Seoul. Different symbols denote different clusters of stations.

0.1일 때 (+ 표시, 북북동 지점부터 시계바늘 방향으로) 상계동, 효계동, 불광동과 같이 거리가 있는 경우도 있지만 대부분 군집 내 측정소가 인접하여 이와 같은 사실을 확인할 수 있다. 거리가 있음에도 같은 군집으로 분류되었다면 물리적으로 같은 환경을 공유하기보다 주어진 환경에서 오염물질의 거동이 유사하였을 수 있다. 어떠한 경우든 복수의 측정소가 유사한 대기환경과 오염 현상을 대상으로 하고 있다면 그 중에서 필요한 측정소를 선택할 수 있다(USEPA, 2007).

3. 측정소 평가

같은 군집 내에서 하나의 측정소만을 선택한다면 (그림 1) p<0.01일 때는 군집 내 측정소가 둘인 군

집이 두 개이므로 4개의 측정소 중 군집 당 하나씩 두 개의 측정소를 선택할 수 있다. 같은 방식으로 p<0.05일 때는 4개 군집 9개 측정소 중 4개 측정소, p<0.1일 때는 6개 군집 14개 측정소 중 6개 측정소를 선택할 수 있다. 표 1은 p<0.05인 군집을 대상으로 측정소를 평가한 모습이다. p<0.01은 군집수가 너무 작고 p<0.1은 상대적으로 유의확률이 느슨하기 때문이다. 평가 방법에 따라 달라지는 평가 결과 대신 평가의 틀을 제안하고자 이에 집중할 수 있도록 측정소명을 고유명칭 대신 숫자를 포함한 기호로 표시하였다.

군집분석이 24시간 PM₁₀과 일최고 8시간 [오존+NO₂]의 두 변수를 이용한 데 비하여 표 1의 측정소 평가는 99백분위수(99th percentile, 99th percentile)와 초과일수(NEDs, number of exceedance days) 등 고농도를 기초로 하였다. 도시대기측정망의 1차 목적이 환경기

Table 1. Assessment of air monitoring stations on the basis of the cluster analysis with $p < 0.05^a$.

| Station | O_3+NO_2 cluster | | | | | PM_{10} cluster | | | | | Ranking | |
|---------|-----------------------------------|----------------------------|----------------|--------------------|--------------------|-------------------|---------------------|-------------------|-------|-------|---------|--------------|
| | O_3+NO_2 99%ile ^b | O_3 NEDs ^c | NO_2 NEDs | Index ^d | Score ^e | Station | PM_{10} 99%ile | PM_{10} NEDs | Index | Score | Station | Score sum |
| S003 | 128 | 27.3 | 23.0 | 0.73 | 4.00 | S004 | 191 | 18.7 | -0.17 | 5.00 | S004 | 10.00 |
| S005 | 120 | 24.7 | 5.7 | -0.69 | 0.31 | S006 | 198 | 19.3 | 0.15 | 1.15 | S008 | 10.00 |
| S004 | 129 | 46.3 | 4.7 | 0.78 | 5.00 | S008 | 184 | 17.0 | -0.70 | 5.00 | S010 | 10.00 |
| S020 | 123 | 49.7 | 6.3 | 0.31 | 1.31 | S009 | 186 | 18.7 | -0.35 | 0.65 | S016 | 10.00 |
| S021 | 116 | 30.3 | 22.3 | -0.42 | 0.58 | S016 | 175 | 20.7 | -0.30 | 5.00 | S025 | 10.00 |
| S008 | 127 | 38.0 | 10.0 | 0.54 | 5.00 | S022 | 155 | 19.3 | -1.15 | -0.15 | S014 | 6.92 |
| S009 | 113 | 28.3 | 4.7 | -1.26 | -0.26 | S023 | 152 | 17.0 | -1.68 | -0.68 | S003 | 6.83 |
| S014 | 121 | 32.3 | 23.0 | 0.08 | 4.00 | S025 | 160 | 18.3 | -1.19 | 5.00 | S018 | 5.06 |
| S017 | 116 | 32.0 | 21.7 | -0.42 | 0.58 | S001 | 193 | 21.3 | 0.36 | 2.36 | S013 | 4.95 |
| S001 | 120 | 25.0 | 18.3 | -0.34 | 1.66 | S002 | 166 | 17.0 | -1.24 | 0.76 | S015 | 4.91 |
| S002 | 124 | 25.3 | 10.7 | -0.08 | 1.92 | S003 | 198 | 23.0 | 0.83 | 2.83 | S019 | 4.84 |
| S006 | 114 | 27.7 | 8.0 | -1.08 | 0.92 | S005 | 200 | 21.7 | 0.64 | 2.64 | S011 | 4.56 |
| S007 | 118 | 28.7 | 25.0 | -0.24 | 1.76 | S007 | 190 | 22.7 | 0.52 | 2.52 | S007 | 4.28 |
| S010 | 125 | 35.7 | 2.0 | 0.07 | 5.00 | S010 | 195 | 19.7 | 0.12 | 5.00 | S001 | 4.01 |
| S011 | 122 | 16.0 | 20.0 | -0.26 | 1.74 | S011 | 200 | 22.7 | 0.82 | 2.82 | S012 | 4.00 |
| S012 | 111 | 12.7 | 14.7 | -1.60 | 0.40 | S012 | 204 | 26.3 | 1.60 | 3.60 | S017 | 3.68 |
| S013 | 125 | 34.7 | 25.7 | 0.61 | 2.61 | S013 | 194 | 21.0 | 0.33 | 2.33 | S005 | 2.95 |
| S015 | 126 | 23.3 | 25.7 | 0.50 | 2.50 | S014 | 200 | 23.3 | 0.92 | 2.92 | S024 | 2.85 |
| S016 | 128 | 47.0 | 22.7 | 1.20 | 5.00 | S015 | 194 | 21.3 | 0.40 | 2.40 | S020 | 2.76 |
| S018 | 122 | 13.0 | 42.0 | 0.20 | 2.20 | S017 | 197 | 24.7 | 1.09 | 3.09 | S002 | 2.67 |
| S019 | 122 | 23.7 | 14.3 | -0.29 | 1.71 | S018 | 198 | 23.3 | 0.86 | 2.86 | S022 | 2.57 |
| S022 | 127 | 33.3 | 23.7 | 0.71 | 2.71 | S019 | 202 | 24.0 | 1.13 | 3.13 | S006 | 2.07 |
| S023 | 127 | 41.3 | 16.0 | 0.75 | 2.75 | S020 | 183 | 18.0 | -0.55 | 1.45 | S023 | 2.07 |
| S024 | 121 | 32.7 | 21.3 | 0.09 | 2.09 | S021 | 175 | 15.7 | -1.20 | 0.80 | S021 | 1.38 |
| S025 | 122 | 41.7 | 10.0 | 0.10 | 5.00 | S024 | 154 | 19.0 | -1.24 | 0.76 | S009 | 0.39 |

^aHorizontal lines indicate the grouping of clusters for O_3+NO_2 and PM_{10} , respectively. Stations below the lowest horizontal lines are not grouped as clusters. For averaging times of O_3 , NO_2 , O_3+NO_2 , and PM_{10} , see the text.

^b99th percentile averaged over 3 years (2009~2011). Concentrations of O_3+NO_2 and PM_{10} are in ppb and $\mu g/m^3$, respectively.

^cNumber of exceedance days (NEDs) of the standards averaged over 3 years (2009~2011).

^dSummed after normalization [$(x-\text{mean})/\text{standard deviation}$] of each of the 99th percentile and the number of exceedance days. In case of O_3+NO_2 , the numbers of exceedance days for O_3 and NO_2 are averaged and added to the 99th percentile.

^e5=trends station including comprehensive air monitoring station, 4=station of higher index within the cluster, index+1=other station within the cluster, index+2=station which is not grouped as clusters.

준 감시이기 때문이다(KME, 2010). [오존+ NO_2] 백분위수는 연도별로 일최고 8시간 [오존+ NO_2]의 99백분위수를 구한 후 평균한 것이다. 오존과 NO_2 의 초과일수는 각각 일최고 8시간 오존과 24시간 NO_2 의 연도별 초과일수를 평균하였다. 그러나 이들은 크기가 다르므로 각각을 x라 할 때 ($x=99$ 백분위수 혹은 초과일수) 이들의 평균과 표준편차를 구한 후 $(x-\text{평균})/\text{표준편차}$ 형태로 표준화하여 합산함으로써 지수(index)화 하였다. 따라서 당초 값이 평균보다 작으면 지수는 음이 되고 절대 값이 α 라면 평균과의 차이는 표준편차의 α 배가 된다. [오존+ NO_2]은 오존과 NO_2 각각에 대하여 초과일수가 주어졌기 때문에

지수를 산출할 때 먼저 이들을 평균한 후 99백분위수의 표준값과 더하였다.

군집 내에서는 99백분위수와 초과일수를 표준화하여 합산한 지수가 높은 즉, 오염물질 농도가 높은 측정소를 선택하였다. 하지만 군집 내 종합대기측정소나 대표측정소가 포함되어 있을 때는 이를 선택하였다. 종합대기측정소는 제주도를 제외한 15개 시·도에 1개씩 설치되어 시·도별 대기오염 관리의 중심 역할을 담당한다(KME, 2010). 대표측정소에 대해서는, 도시대기측정소 수가 증가함에 따라 환경부와 국립환경과학원이 꾸준히 관심을 가지고 있었고(KME, 2012; NIER, 2008) 수도권 특별법 2차 기본계획에서

는 대상 기간 일관성을 유지할 수 있도록 이를 토대로 서울, 인천, 경기 등 지역 평균을 산출하도록 하였다. 대표측정소 명칭의 적합성이 논란이 됨에 따라 (대기오염측정망 심사·평가 위원회, 2013. 5. 23) 장기추이 분석이 주요 목적의 하나라는 점에서 최근에는 추이측정소(trends station)라는 명칭을 사용하기도 하였다(KME, 2014).

군집 내 추이측정소(혹은 대표측정소; 종합대기측정소 포함)가 있을 때는 5점, 추이측정소가 없을 때는 99백분위수와 초과일수를 표준화하여 합산한 지수가 높은 측정소에 4점의 점수(score)를 부여하였다. 나머지 측정소에는 지수에 1을 더하였다. 군집으로 분류되지 않은 측정소의 경우도 추이측정소에는 5점을 부여하였으나 나머지 측정소에는 지수에 2를 더하였다. 여러 가지 조합을 시도한 결과 이와 같은 측정소 구분과 배점이 가장 합리적으로 판단되어 제시하였으나 관점이 다르다면 다양한 방식으로 조정할 수 있다. PM₁₀에 대해서도 동일한 방식으로 점수를 산정한 후 두 점수를 합산하여 마지막 열에 내림차순으로 배열하였다.

4. 요약 및 결론

환경기준 달성률이 특히 낮은 8시간 오존과 24시간 PM₁₀ 환경기준 감시에 초점을 맞추어 서울지역 도시대기측정망 25개 측정소를 평가하였다. 대기환경이 유사한 지역에서는 측정이 중복되지 않도록 같은 군집 내에서는 추이(혹은 대표) 측정소나 오염물질 농도가 높은 측정소에 대하여 명확하게 배점을 높였다. 표 1에서는 5개 추이측정소를 가정하였다. 25개 측정소의 20%이다. 추이측정소 수가 변하면 점수 10인 측정소 수와 군집이 같을 때 선택된 측정소가 달라질 뿐 8시간 [오존+NO₂]와 24시간 PM₁₀ 농도가 중요한, 대부분 다른 측정소의 평가 결과는 동일하다. 추이측정소에 5점을 부여하고 군집 내 일반 측정소는 지수에 1점을 더하는 등 점수에 차이를 둔 것은 각각 종합대기측정소 등 추이측정소를 높게 평가한 반면 군집 내 일반측정소를 낮게 평가한 결과이다.

측정망 체계가 갖추어짐에 따라 양적 팽창보다 질적 변화를 추구하게 되고 다양한 필요에 의하여 측

정소별 평가에 대한 요구가 높아질 가능성이 크다. 이번 연구에서는 오염물질 농도만을 이용하여 측정소를 평가하였으나 특별히 감시가 필요한 지역에 대해서는 배점을 높이는 등 공간적 특성도 고려할 수 있다. 수도권 특별법의 기본계획에서는 시·도별 평균을 목표로 설정하는 등 우리나라에서는 지역 평균에 대한 관심이 크므로 만일 측정소 수 축소를 위하여 측정소를 평가한다면 측정소 수 변화에 따른 지역 평균의 변화도 살펴야 한다.

감사의 글

이 연구는 한국외국어대학교 교내학술연구의 일환으로 진행되었습니다. 도시대기측정망 자료를 제공한 국립환경과학원에 감사드립니다.

References

- Bae, M.S., C.H. Jung, Y.S. Ghim, and K.H. Kim (2013) A proposal for the upgrade of the current operating system of the Seoul's atmospheric monitoring network based on statistical analysis, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 29, 447-458. (in Korean with English Abstract)
- Baek, S.-O. and C.-G. Jeon (2013) Current status and future directions of management of hazardous air pollutants in Korea - focusing on ambient air monitoring issues -, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 29, 513-527. (in Korean with English Abstract)
- Ghim, Y.S. and C.H. Kim (2013) Regional trends in short-term high concentrations of criteria pollutants from national air monitoring stations, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 29, 545-552. (in Korean with English Abstract)
- Kim, J.-H. and J.J. Lee (2013) Management changes of hazardous air pollutants sources and its proposed improvement in Korea, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 29, 536-544. (in Korean with English Abstract)
- Kim, Y.P. and M.J. Yeo (2013) The trend of the concentrations of the criteria pollutants over Seoul, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 29, 369-377. (in Korean with English Abstract)
- KME (Korea Ministry of Environment) (2009) Studies for Revision and Repreparation of the Master Plan of Air

- Pollution Monitoring Network, Report Prepared by the Inha University.
- KME (2010) Operation Plan of Air Pollution Monitoring Network (2011-2015), Climate and Air Quality Management Division.
- KME (2011) Guideline on Installation and Operation of Air Pollution Monitoring Network.
- KME (2012) Development of Upgrade Strategy of Air Pollution Monitoring Network for Enhancing the Reliability of Air Pollution Assessment, Report Prepared by the Hankuk Univ. Foreign Studies.
- KME (2014) Preparation of Strategies for Improving the Operation Plan of Air Pollution Monitoring Network, Report Prepared by the Hankuk Univ. Foreign Studies.
- KME and MAMO (Metropolitan Air Quality Management Office) (2013) The Second-Phase Master Plan for the Metropolitan Air Quality Management [2015-2024].
- MAMO (Metropolitan Air Quality Management Office) (2010) Studies for Revision of the Master Plan for the Metropolitan Air Quality Management, Report Prepared by the Korean Soc. Atmos. Environ.
- NIER (National Institute of Environmental Research) (2008) A Study of Methods for Improving the Air Pollution Monitoring Network, Report Prepared by the Hankuk Univ. Foreign Studies.
- NIER (2013) Annual Report of Air Quality in Korea 2012.
- Seinfeld, J.H. and S.N. Pandis (1998) Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change, John Wiley & Sons.
- Song, S.K., Y.K. Kim, Z.H. Shon, and J.Y. Ryu (2012) Photochemical analyses of ozone and related compounds under various environmental conditions, Atmos. Environ., 47, 446-458.
- Suzuki, R. and H. Shimodaira (2006) Pvcust: an R package for assessing the uncertainty in hierarchical clustering, Bioinformatics, 22, 1540-1542.
- USEPA (US Environmental Protection Agency) (2007) Ambient Air Monitoring Network Assessment Guidance. Analytical Techniques for Technical Assessments of Ambient Air Monitoring Networks, EPA-454/D-07-001, Report prepared by Sonoma Technology, Inc.