

## 오염원 및 기상 조건에 따른 울산지역의 고농도 대기오염 분포 특성

최봉욱 · 정종현\*<sup>†</sup> · 최원준\*\* · 손병현\*\*\* · 오광중\*\*

울산보건환경연구원 환경과, \*서라벌대학 보건행정과,  
\*\*부산대학교 환경공학과, \*\*\*한서대학교 환경공학과

## Characteristics of the Distribution of High Ambient Air Pollutants with Sources and Weather Condition in Ulsan

Bong-Wook Choi · Jong-Hyeon Jung\*<sup>†</sup> · Won-Joon Choi\*\* ·

Byung-Hyun Shon\*\*\* · Kwang-Joong Oh\*\*

*Department of Environment, Ulsan Institute of Health and Environment*

*\*Department of Health Administration, Sorabol College*

*\*\*Department of Environmental Engineering, Pusan National University*

*\*\*\*Department of Environmental Engineering, Hanseo University*

(Received April 10, 2006/Accepted August 18, 2006)

### ABSTRACT

Five sampling sites were selected to investigate the distribution characteristics of air pollutants with pollution sources and weather conditions in Ulsan. SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, CO, PM<sub>10</sub> concentrations and weather conditions with time were analyzed by using several statistical methods. Also, the distribution characteristics of ambient air quality were estimated by pollution-rose and multi-regression analysis. As a result of the analysis, NO<sub>2</sub>, CO and PM<sub>10</sub> concentrations were high in winter season, whereas SO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> concentrations were high in summer season. This concentration distribution was caused by the unfavorable geographical location, which the residential area was located at the downwind direction to industrial area. From the pollution-rose, we confirmed that each pollutant influenced the downwind residential areas because of seasonal wind direction. SO<sub>2</sub> concentration has shown positive correlation of 0.2~0.3 for NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> and temperature, while O<sub>3</sub> concentration has shown negative correlation. Also, NO<sub>2</sub> and CO concentrations, pollutants generated by combustion, have shown positive correlation, while O<sub>3</sub> concentration and temperature have shown negative correlation. Therefore, it could be suggested that a seasonal air quality policy and a new guideline of air quality was necessary in each season with wind directions to reduce the air pollution level in Ulsan.

**Keywords:** air pollutant, emission source, weather condition, pollution-rose, regression analysis

### I. 서 론

최근 삶의 질 향상과 더불어 쾌적한 환경에서 살 권리가 새롭게 인식되고 있으며, 특히 쾌적한 환경에 대한 관심은 기존의 수질 및 대기환경과 함께 관련분야가 점점 확대되고 있는 실정이다. 이와 함께 자동차의 증가로 인한 고농도 오존의 발생 및 기타 황사, 산성비, 휘발성 유기화합물질(VOCs), 특정 대기유해물질

(HAP), 환경호르몬류 등과 같은 환경오염물질이 주목받고 있으며, 대기질 개선에 대한 여론 또한 증대되고 있는 상태이다. 그 결과 시민의 역할도 환경오염을 신고하고 감시하는 방향에서 자기가 살고 있는 환경의 수준을 개선시키기 위하여 행정기관에 대한 감시 및 감독을 요구하는 수준까지 확대되고 있으며, 이러한 현실에서 시민의 건강을 지키기 위한 각종 노력은 과거 어느 때보다도 증대되고 있다.<sup>1,4)</sup> 이와 함께 인간이 호흡하는 공기의 오염은 수질오염과 달리 그 피해 양상이 즉시 외부로 나타나지 않지만 장기간 오염된 공기에 노출된 이후에는 일정한 수준이상에 도달하면 회복하기 힘든 상태의 건강악화나 보건학적 피해 및 재산상의 피

<sup>†</sup>Corresponding author : Department of Health Administration, Sorabol College  
Tel: 82-54-770-3713, Fax: 82-54-741-5429  
E-mail : airgas@sorabol.ac.kr

해를 유발함으로 사후대책보다는 사전예방에 더 많은 관심을 기울이는 것이 합리적인 것으로 사료된다.

한편, 울산 및 온산지역은 우리나라 제일의 공업도시로서 다른 지역에 비해 오염도가 심하고, 많은 공장에서 배출되는 환경오염물질은 대기 중에서 확산되어 주변지역의 생활환경과 토양 등에 악영향을 미치므로 1986년 3월 18일부터 대기 특별대책지역으로 지정되어 보다 엄격한 대기환경기준을 적용하고 있다. 울산시 남구와 북구, 울주군 온산읍에는 중화학공업단지과 비철금속단지 등이 분포되어 있고, 고정 배출원의 대부분은 남동쪽 해안에 위치하여 공업단지 입지적으로는 효율적이나, 주거지역에 너무 근접하여 위치하고 있어 공업지역에서 발생한 환경오염물질은 기상상황에 따라 항상 주거지역으로 확산될 위험성이 클 것으로 예측되어 대기오염물질의 발생원 중심 관리가 필수적으로 요구된다. 또한 울산은 대기오염물질의 영향권에 주거지역이 대부분 위치하므로 봄과 여름은 남동풍 및 남서풍의 영향으로 항상 환경오염물질의 확산 반경 내에 있는 반면, 가을과 겨울은 북동풍 및 북서풍의 영향으로 환경오염물질의 확산 반경에 거의 들지 않는 오염원의 입지적·계절적인 분포 특성을 가지므로 계절에 따른 환경오염물질의 농도특성 파악이 특히 중요하다 할 수 있으며,<sup>5,6)</sup> 대기오염원이 있는 공장의 배출오염물질의 농도를 조사하여 이로 인한 환경오염정도를 분석하고, 이에 대한 대처방안을 강구하는 것이 필요한 시점이다.

이러한 입지적 바탕에서 공업지역 내 환경오염물질 발생원 분포현황을 바탕으로 계절별 발생원의 대기오염도 기여 특성을 파악하는 것은 울산의 주거지역에 영향을 미치는 대기오염물질을 저감하는 효율적인 방안 마련에 바탕이 될 수 있다. 이에 울산지역에서 ISCST3 (Industrial Source Complex Short Term) model을 이용한 환경오염 예측이 시도되었으며,<sup>7)</sup> 기상조건과 연계한 오염원별 대기오염 기여도 평가결과<sup>8-10)</sup> 대기오염물질 발생원과 대기오염물질 및 기상조건이 큰 상관관계를 나타내었다. 따라서 본 연구에서는 고정배출원 및 이동배출원 등을 포함한 대기오염물질 발생원 현황을 파악하고, 다양한 대기오염물질 중 대기측정망으로 감시하고 있는 입자상물질(PM<sub>10</sub>)과 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> 및 CO 등과 같은 가스상물질을 대상으로 기상학적 요소와 관련하여 울산지역에서의 분포특성을 지역별 및 연중 계절별로 고찰하고자 한다. 이러한 기초연구는 향후 울산지역 주민들이 체감할 수 있는 효과적인 대기개선 정책수립에 도움이 될 수 있을 것으로 사료되며, 나아가 울산, 온산 및 인근 지역의 대기질 향상을 유도하는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

## II. 방 법

### 1. Pollution-rose

본 연구에서는 울산 내 공업지역의 대기 중금속 성분별로 발생원 기여도 평가를 위하여 pollution-rose를 이용하여 오염농도 기여도를 실시하였다. Pollution-rose는 풍향별 비가중 평균농도에서의 순간 고농도로 인한 오류를 배제하기 위하여 식 (1)을 이용하여 16방위 풍향별로 24시간 가중으로 평균한 오염농도 변화와 바람장미를 합성하는 방법으로 조사지점별 각각의 풍향별로 연중 오염농도 변화를 도출하였다.

$$(TWMC)_n = \frac{\sum(t_{i,n} \times C_i)}{\sum t_{i,n}} \quad (1)$$

여기서, TWMC(time-weighted mean concentration)는 각각의 조사지점별로 16방위로 나눈 풍향별 빈도수( $t_{i,n}$ )와 각각 방위별 풍향에서의 일 평균농도( $C_i$ ) 값을 곱하여 합산한 단위 풍향별 총 농도를  $\sum(t_{i,n} \times C_i)$ 로 산출한 후 단위 풍향별 빈도수의 합( $\sum t_{i,n}$ )으로 나눈 농도이다. 이는 전체 조사기간 중 각각의 단위 방위별 풍향에서의 총량적인 평균농도를 나타낸다.

### 2. 측정항목, 기상인자간의 상관계수 및 다중회귀분석

연구대상 가스상 대기오염물질 각 항목 및 기상요소 상호간 연관성을 조사하기 위하여 측정 기간 중의 각 항목별 1시간 주기 측정자료 약 43,800개 모드를 대상으로 하여 식 (2)의 모상관계수(population correlation coefficient)를 적용하여 표준화된 공분산으로 상관계수를 도출하였다.

$$\rho = \text{Corr}(X, Y) = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (2)$$

여기서 Cov( $X, Y$ )는 오염물질 및 기상인자 등 변수간 공분산을,  $\sigma_X$ 와  $\sigma_Y$ 는 각 변수의 표준편차를 의미한다. 또한, 풍속, 온도 및 상대습도를 변수로 한 대상 대기오염물질과의 변동추이를 유의수준 0.05를 적용한 식 (3)의 다중회귀분석(multiple regression analysis)으로 나타내었다. 통상 유의수준 0.05는 각 변수간의 유의한 선형회귀에서 잘못된 결론을 도출할 가능성이 5%에 해당하는 확률이다.

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_p X_{pi} + \varepsilon_i \quad (3)$$

for  $i = 1, 2, \dots, n$

여기서 아래 첨자  $i$ 는 관측 지점,  $p$ 는 대기오염 물질 또는 기상인자를 나타내며,  $X$ 와  $Y$ 는 각각 독립 변수와

중속 변수로서의 대기오염 물질 또는 기상인자를 의미한다.  $\beta$ 와  $\varepsilon$ 은 각 독립변수에 대한 기울기와 절편을 의미한다.

### III. 대상지역 선정 및 분석

#### 1. 조사 대상지역의 선정

본 연구의 조사지점은 울산지역의 대기질 분포를 파악하기 위하여 울산지역에 설치된 14개 측정소 중 지리적 위치와 용도별 특성을 고려하여 Fig. 1에서와 같이 총 5개 지점을 선정하였다. 우선 지리적 위치에 따라 동쪽에 위치한 대송동지점(1), 서쪽의 무거동지점(2), 남쪽의 원산지지점(3) 3곳, 용도별로는 공업지역인 부곡동지점(4)과 주거지역인 삼산동지점(5) 2곳을 각각 선정하였다. 이상과 같이 총 5개 지점을 기준으로 울산지역의 지리적 위치별, 도시계획법상의 용도별 시료채취 지점을 확보하여 울산 전 지역의 특성을 대표할 수 있도록 하였다.

#### 2. 시료채취 및 분석

시료채취는 대기오염측정망 운영지침을 준수하여 2003년 3월부터 연중 상시로 측정하였으며, 만일 시료채취기간 중에 강우가 관측되면 시료채취는 강우 종료 후 계속 채취하였다. 연구대상 지역별 조사자료는 측

정지점별 대략적인 차이는 있으나, 약 85% 정도 시간 가동율을 적용하여 단위 지점별 8,300개 이상의 유효 자료를 선정하였다. 한편, 연구에 적용한 풍향, 풍속, 온도 및 습도는 각 측정소의 자료를 이용하였으며, 울산기상대의 기상자료를 참고하였다.<sup>11)</sup> 한편, 각 항목별 측정장비중 SO<sub>2</sub>는 미국 API社(Model: 100A)와 ML社(Model: ML9850B)의 분석기를 사용하였고, NO<sub>2</sub>는 미국 API社(Model: 200A)와 ML社(Model: ML9841B)의 분석기를 이용하였으며, CO는 미국 API社(Model: 300)와 ML社(Model: ML9830B)의 분석기를 이용하였다. O<sub>3</sub>는 미국 API社(Model: 400A)와 ML社(Model: ML9810B)의 분석기를 이용하였으며, PM<sub>10</sub>은 미국 MET ONE社(Model: BAM-1020)와 Andersen社(Model: FH62C14)의 분석기를 이용하였고, 기상자료는 미국 MET ONE社(Model: 10C & 20C)의 장비를 이용하여 풍속 및 풍향을 각각 측정하였다.

### IV. 결과 및 고찰

#### 1. 대기질 분포 특성 현황

대상 측정소의 연중 시간대별 측정자료를 바탕으로 Fig. 2와 같이 상자그림(box plots)을 이용하여 통계처리를 한 것이다. 상자그림에서 상자의 하한(lower limit)과 상한(upper limit)은 각 자료의 25번째 백분위값

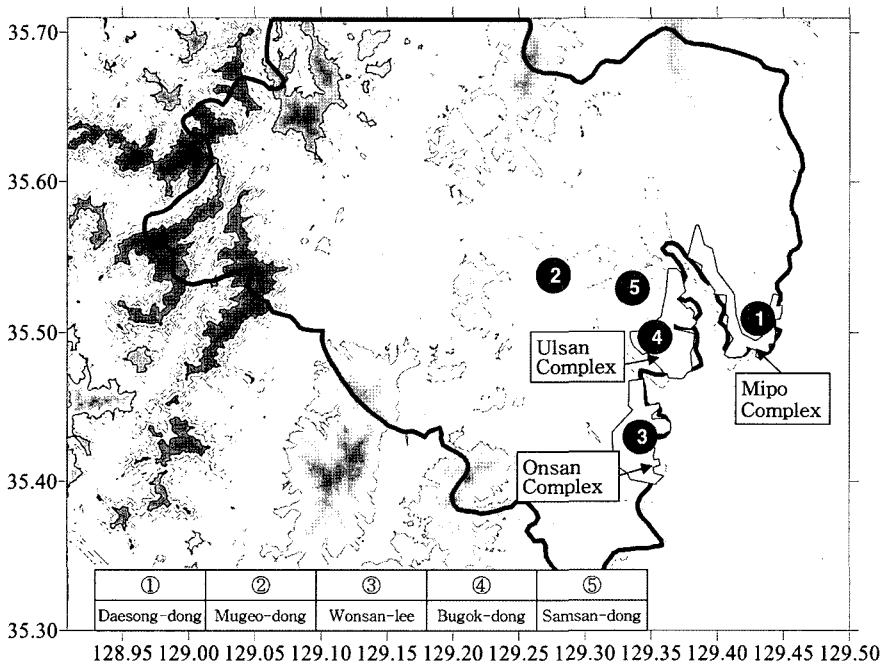


Fig. 1. Location of sampling sites in Ulsan.

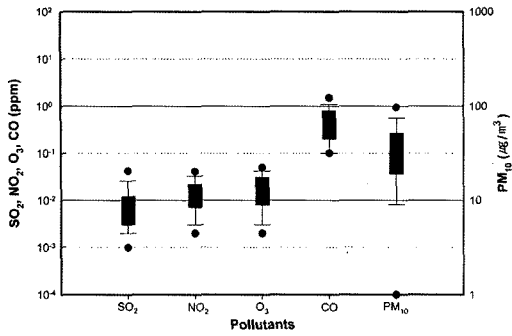


Fig. 2. Average concentrations of SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, CO and PM<sub>10</sub> in Ulsan.

(percentile)과 75번째 백분위값을 의미하며, 상자와 연결하는 선을 구레나룻(whisper)이라고 하며, 위구레나룻과 아래구레나룻은 각각 최대값(90번째 백분위값)과 최소값(10번째 백분위값)을 의미한다. 각 항목별 울산지역 전체의 평균 대기오염도는 SO<sub>2</sub> 0.011 ppm, NO<sub>2</sub> 0.017 ppm, O<sub>3</sub> 0.021 ppm, CO 0.6 ppm, PM<sub>10</sub> 40 µg/m<sup>3</sup>으로 NO<sub>2</sub>, CO, PM<sub>10</sub>은 동절기에 높은 농도분포를 나타내었고, 이와 반대로 하절기에는 SO<sub>2</sub>와 O<sub>3</sub>가 높은 농도분포를 나타내었다. 이는 동절기의 NO<sub>2</sub>, CO, PM<sub>10</sub>의 고농도분포는 비공업지역 비점오염원의 난방연료 사용에 기인한 것으로 판단되었으며, 하절기 SO<sub>2</sub>의

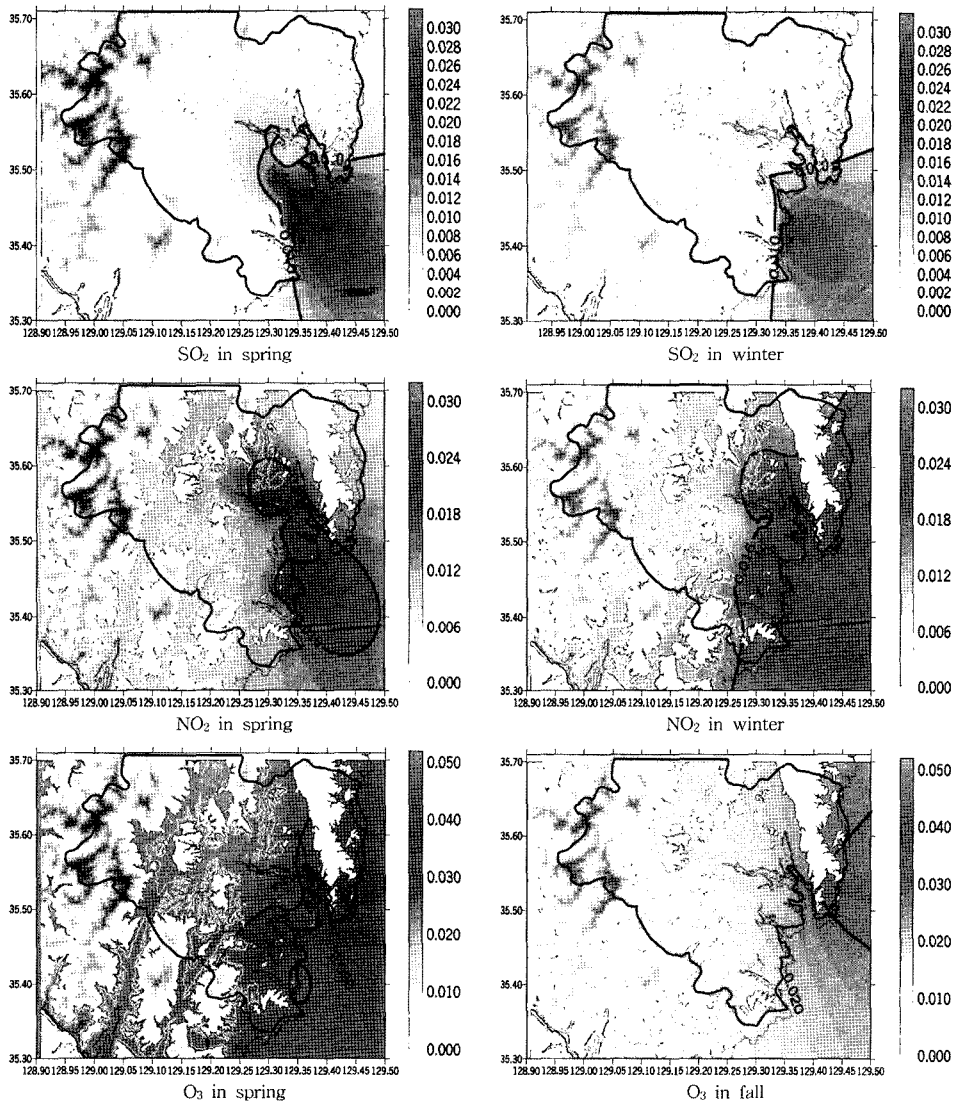


Fig. 3. Distributions of pollutants concentration with season in Ulsan.

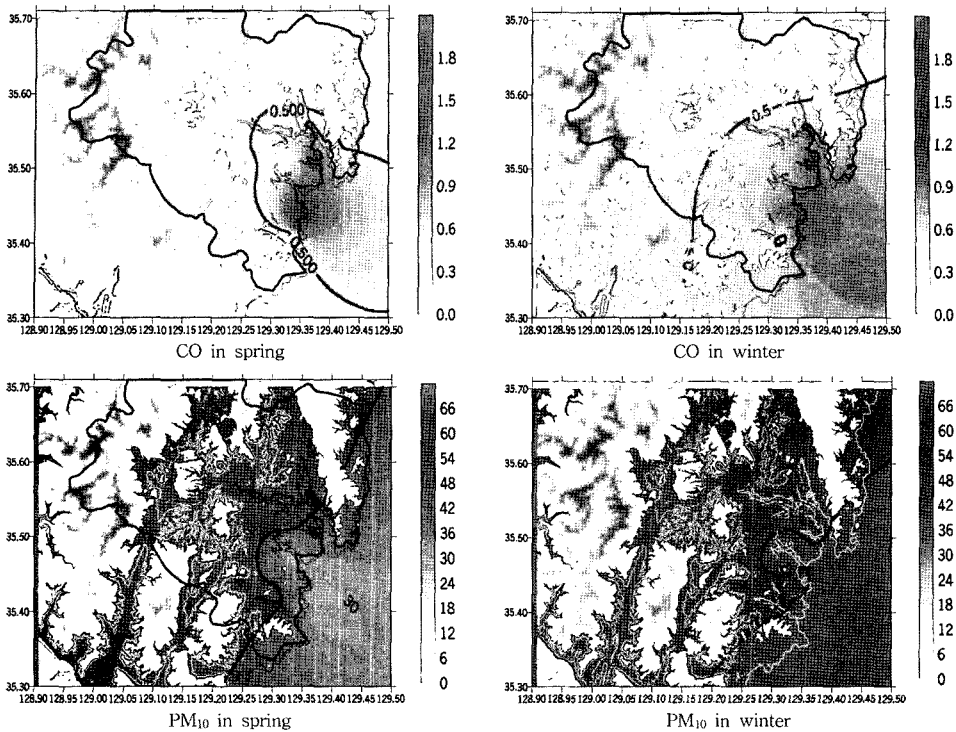


Fig. 3. Continued.

고농도 분포는 공업지역의 점오염원에 의한 배출량이 바람의 영향으로 풍하측 측정소에 다량 기여하였으며, O<sub>3</sub>은 봄철의 기온상승에 따른 고농도 오존에 기인한 것으로 사료된다.<sup>12)</sup>

한편, 울산지역의 오염물질의 계절별 풍향과 발생원 간의 관계를 규명하기 위하여 Fig. 3에서는 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, CO, PM<sub>10</sub>의 계절별 등농도곡선을 나타내었으며, 조사결과 온산공업지역이 최대오염물질 농도분포를 나타내어 이전의 연구결과<sup>7)</sup>와 유사한 경향을 나타내었다. 먼저 0.010 ppm를 비교선으로 설정한 SO<sub>2</sub>의 농도 변화는 봄철에는 울산의 공업단지 전 지역과 남구의 중앙지역이 비교적 고농도를 나타내었다. 그리고 여름철에 접어들면서 이 범위는 더욱 확장되어 대부분의 동구와 중구 일부지역이 포함되는 것으로 나타났다. 그러나 가을에는 0.010 ppm 비교선이 남쪽으로 남하하였으며, 겨울철에는 SO<sub>2</sub> 오염물질이 대부분 주거지역에서 벗어나는 것으로 확인되었다. NO<sub>2</sub> 역시 온산공단지역과 남구의 공업지역에서 최대도가 나타났으며, 0.016 ppm을 비교선으로 설정한 NO<sub>2</sub>의 농도 변화는 봄철에는 울산의 공업지역 전지역과 남구의 삼산동, 중구의 남쪽지역으로 태화강을 따라 비교적 고농도를 나타내었다. 그러나 SO<sub>2</sub>와는 반대로 여름철에 접어들면서 이

범위는 대부분 축소되어 비교선이 나타나지 않았다. 가을에는 0.016 ppm의 비교선이 남쪽으로 남하하여 온산공단 일부지역을 제외하고는 대부분의 울산지역이 저농도를 나타내었다. 그러나 겨울철에는 비교선이 울산의 대부분의 주거지역으로 상승하여 남구, 동구, 중구 전역과 북구의 남쪽이 포함되는 것으로 나타났으며, NO<sub>2</sub>는 겨울철에 가장 오염도가 심하고 여름철에 가장 오염도가 낮게 나타났다. 즉 동절기에는 하절기보다 2배 정도 높게 나타났는데, 이는 동절기에 주거지역에서 사용하는 난방연료의 급격한 증가와 연관되는 것으로 판단된다.

O<sub>3</sub>의 경우 연중 농도 변화가 비교적 적은 편으로 다른 항목과 달리 동구지역과 온산공단과 남구 석유화학공단 주변에서 비교적 높은 분포를 나타내었다. 0.026 ppm를 비교선으로 설정한 O<sub>3</sub>의 농도 변화는 봄철에는 동남풍과 하절기 해풍의 고농도 오존의 영향으로 동구와 온산의 해안지역이 비교적 높은 농도를 나타내었으며, 이전의 연구결과<sup>13,14)</sup>와 같이 해풍에 의한 풍하측 고농도 발생과 같은 경향을 나타내었고, 여름철에 접어들면서 이 범위는 대부분 축소되어 비교선이 해양으로 후퇴하는 것으로 나타났으며, 이는 연구기간의 경우 하절기 대부분이 우기에 해당되어 고농도 오존이 출현하지

않은 결과로 판단되었다. 가을에는 0.016 ppm 비교선이 동구의 일부지역으로 편중되어 울산의 경우에는 해양 오존의 영향을 주로 받는 것으로 사료되며, 겨울철에는 기온의 강하로 인하여 고농도 오존이 출현하지 않는 것

으로 판단된다.

한편, 0.5 ppm으로 농도분포를 비교선으로 설정한 CO의 농도 변화는 봄철에는 동남풍의 영향으로 대부분의 공업지역과 주거지역이 영향권역에 해당되는 것으

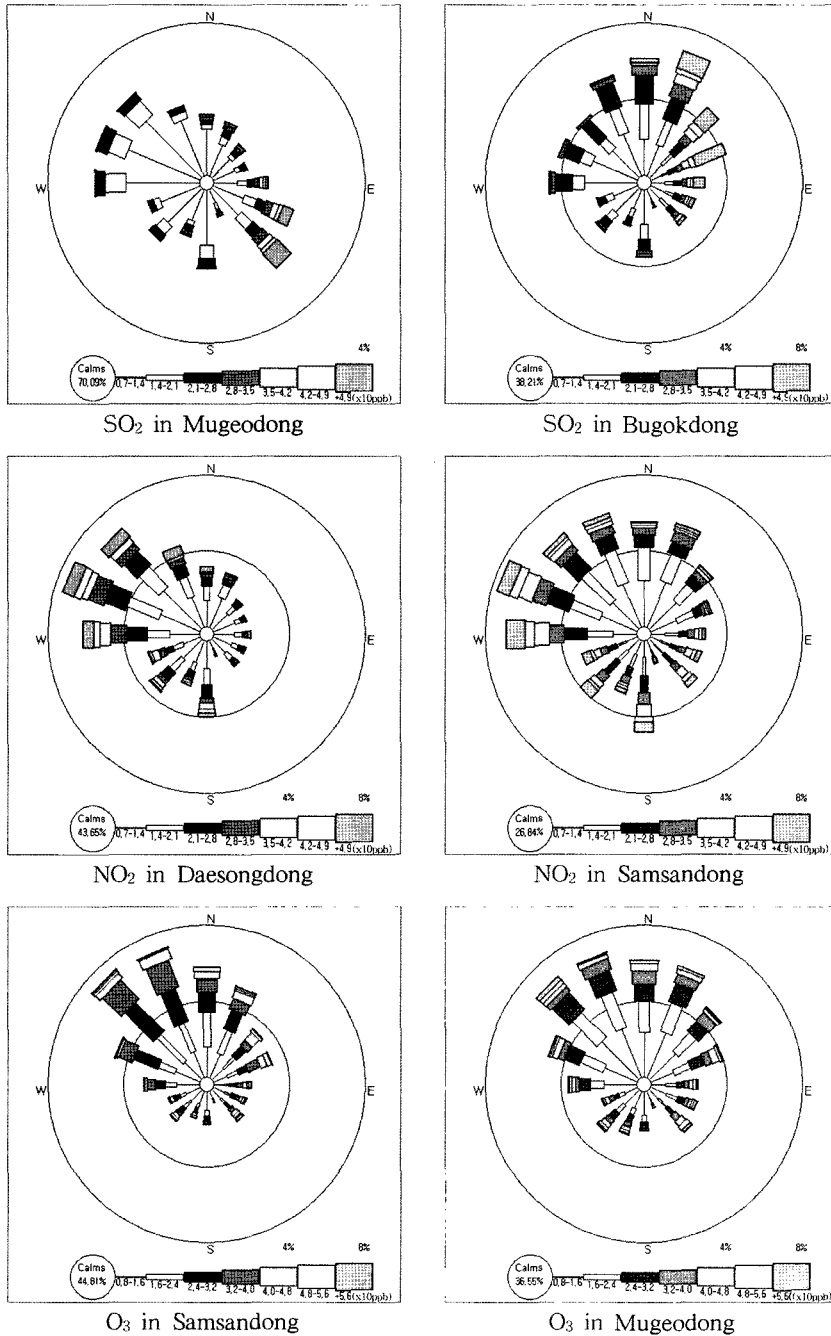


Fig. 4. Pollution-roses (P-R) at each site in Ulsan (unit×10 ppb).

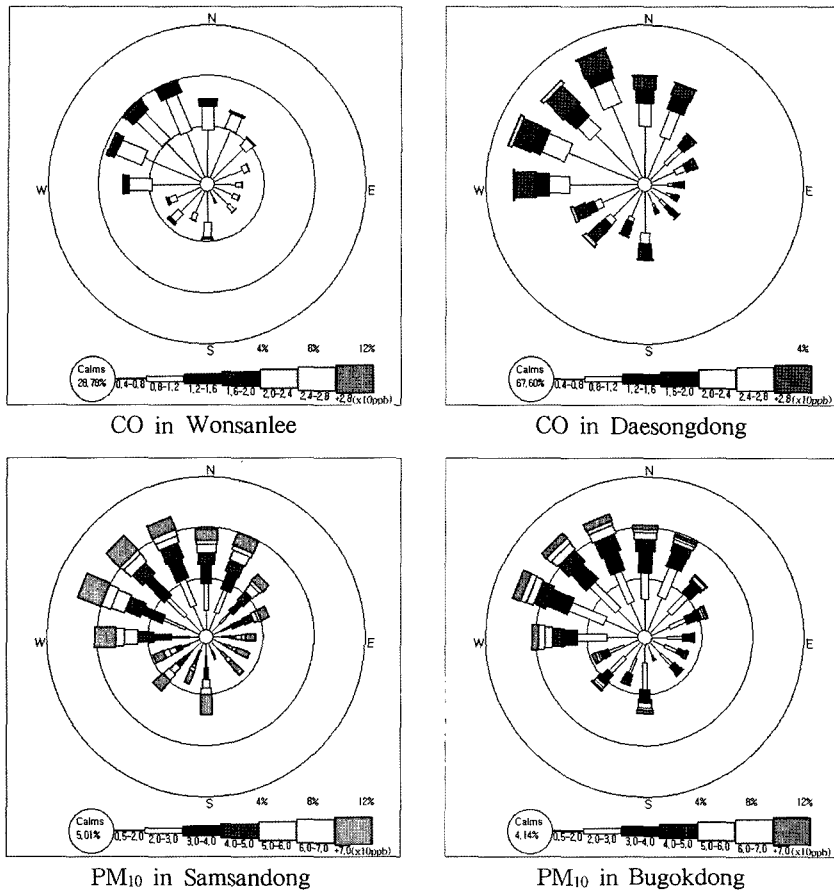


Fig. 4. Continued.

로 나타났으며, 여름철에는 남구와 온산의 공업지역만 해당되는 것으로 나타났다. 가을에는 0.5 ppm의 비교선이 북서풍의 영향으로 울산 전역에서 사라져 비교적 양호한 대기질을 나타내었고, 겨울철로 접어들면서 난방연료의 사용량이 증가하면서 비교선이 대부분의 주거지역으로 확대되어 최고의 CO 농도분포를 나타내었다. 즉, CO는 겨울철에 최고농도를 나타낸 후 봄철에 감소되기 시작하여 가을철에 최소분포를 나타내는 것으로 확인되었다. PM<sub>10</sub>은 연료의 연소 및 폐기물의 소각시설 외 논과 밭, 도로 등의 자연발생원에서 주로 발생하므로 Fig. 1의 배출원 분포현황과는 다른 농도 분포현황을 나타내었다. 42 µg/m<sup>3</sup>의 농도분포를 비교선으로 설정한 PM<sub>10</sub>의 농도 변동현황은 봄철에는 고농도 지역이 오히려 울산의 내륙지역으로 나타났으며, 이는 자연발생원 등에 의한 영향에 기인하는 것으로 나타났다. 그러나 여름철에는 비교선이 더욱 북서쪽으로 상승하여 울산 대부분의 지역이 저농도로 나타났으며, 특히

가을철에는 온산의 점오염을 제외한 대부분의 지역에서 낮게 나타났다. 그러나 북서풍이 주풍인 겨울철로 접어들면서 주거지역 난방연료의 사용량의 증가와 함께 풍속의 증가에 따른 자연발생적 오염원 기여도가 증대되면서 비교선이 대부분의 울산지역 전역으로 확대되는 것으로 나타나 PM<sub>10</sub> 오염도가 증가하는 것으로 나타났다. 즉, PM<sub>10</sub> 역시 CO와 마찬가지로 겨울철에 최고농도를 나타낸 후 봄철에 감소되기 시작하여 가을철에 최소 분포를 나타내는 것으로 확인되었다.

## 2. Pollution-rose를 이용한 발생원 예측

조사대상 지역으로 선정된 5개 특성지점의 발생원 영향을 추정하기 위하여 각각의 항목별로 식 (1)을 적용한 pollution-rose 분석을 실시하여 Fig. 4와 같이 전체 지점의 모든 항목 중에서 특이성이 큰 주요 항목별 농도의 10<sup>-1</sup>배로 표시된 대표지점만을 나타내었다. 특히 울산시가지의 서쪽에 위치한 상업지역인 무거동은 대

부분의 항목에서 울산의 대표적 계절풍인 북서풍 및 북풍계열의 영향과 고속도로와 인근도로 차량 및 이동 오염원의 영향을 받고 있으며, 이중 SO<sub>2</sub>의 경우 최대농도분포가 50 ppb 이상으로 최대빈도를 나타내었고, 이와 병행하여 남동쪽에 위치한 공업단지 지역의 점오염원의 영향도 받는 것으로 확인되었다. 울산의 동부지역에 위치한 주거지역인 대송동은 대부분의 항목에서 북서풍과 남서풍 계열의 영향으로 NO<sub>2</sub>의 최대농도가 약 50 ppb 이상으로 서쪽에 위치한 중공업단지와 남쪽에 위치한 석유화학단지 공업지역의 영향을 직접 받는 것으로 나타났다. 울산 시가지의 중심부이면서 최대 인구 밀집 주거지역인 삼산동은 특징적인 방향으로의 영향은 대부분의 항목에서 북서풍계열에서 주된 오염원으로 나타났으며, 보조적으로 남풍계열의 이동오염원이 기여하는 것으로 조사되었다. 삼산동의 북서풍 오염원은 특성적 오염원이 아니라 연중 주풍의 영향이 북서풍이기 때문인 것으로 사료되었다.

울산의 대표적인 공업지역인 부곡동은 주풍인 북서풍 외에 북풍과 북동풍 계열에서 SO<sub>2</sub>가 최대 50 ppb 이상을 나타내어, 주변에 설치되어 있는 대규모의 연소 및 소각시설 등의 영향을 직접적으로 받는 것으로 판단되었다. 울산의 남쪽에 위치한 대표적 오염원인 온산공단내 원산리는 대부분의 항목에서 북서풍 및 북동풍 계열의 영향으로 주변 공업지역에서 발생하는 대기오염물질의 영향을 직접 받는 것으로 나타났으며, 이와 함께 원산리 남쪽에 위치한 오염원의 영향도 일부 기여하는 것으로 확인되었다. 이러한 조사결과는 이전<sup>13)</sup>의 공단지역 대기오염물질의 고농도 발생현상 연구결과와 유사한 경향을 나타내었으며, 특히 울산지역은 산업단지 등 공업지역의 지리적 분포와 함께 계절풍 등 바람장의 영향이 큰 것으로 사료된다.

3. 오염물질 항목과 기상인자 상호간 상관성 분석

Table 1에서는 5개 조사 대상지역 전체를 대상으로

Table 1. Correlation analysis of pollutants concentration and meteorological factors in Ulsan

Total	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	CO	PM <sub>10</sub>	SPD	RH	TMP
SO <sub>2</sub>	1.000							
NO <sub>2</sub>	<b>0.250</b>	1.000						
O <sub>3</sub>	0.007	-0.140	1.000					
CO	0.139	<b>0.280</b>	-0.050	1.000				
PM <sub>10</sub>	0.067	<b>0.248</b>	0.026	<b>0.245</b>	1.000			
SPD	<b>0.275</b>	0.030	<b>0.278</b>	0.085	-0.027	1.000		
RH	-0.024	-0.112	<b>-0.250</b>	-0.145	-0.100	-0.231	1.000	
TMP	0.084	-0.162	0.084	<b>-0.270</b>	0.005	-0.101	<b>0.329</b>	1.000
Daesongdong	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	CO	PM <sub>10</sub>	SPD	RH	TMP
SO <sub>2</sub>	1.000							
NO <sub>2</sub>	<b>0.277</b>	1.000						
O <sub>3</sub>	-0.207	<b>-0.310</b>	1.000					
CO	0.058	<b>0.216</b>	-0.029	1.000				
PM <sub>10</sub>	<b>0.296</b>	<b>0.240</b>	0.078	<b>0.246</b>	1.000			
SPD	-0.076	-0.036	<b>0.224</b>	0.047	0.024	1.000		
RH	0.023	-0.104	-0.153	<b>-0.257</b>	-0.152	<b>-0.265</b>	1.000	
TMP	<b>0.187</b>	<b>-0.239</b>	0.128	<b>-0.287</b>	0.083	<b>-0.205</b>	<b>0.329</b>	1.000
Bugokdong	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	CO	PM <sub>10</sub>	SPD	RH	TMP
SO <sub>2</sub>	1.000							
NO <sub>2</sub>	0.138	1.000						
O <sub>3</sub>	0.009	-0.108	1.000					
CO	-0.009	0.110	0.191	1.000				
PM <sub>10</sub>	0.029	<b>0.249</b>	-0.015	<b>0.268</b>	1.000			
SPD	0.166	0.114	<b>0.278</b>	0.033	0.169	1.000		
RH	-0.028	-0.179	<b>-0.256</b>	-0.114	-0.086	<b>-0.275</b>	1.000	
TMP	0.114	-0.125	0.073	<b>-0.321</b>	<b>-0.247</b>	-0.151	<b>0.329</b>	1.000



Table 1. Continued

Samsandong	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	CO	PM <sub>10</sub>	SPD	RH	TMP
SO <sub>2</sub>	1.000							
NO <sub>2</sub>	<b>0.276</b>	1.000						
O <sub>3</sub>	0.142	-0.141	1.000					
CO	0.142	<b>0.510</b>	-0.068	1.000				
PM <sub>10</sub>	0.178	<b>0.393</b>	0.071	<b>0.319</b>	1.000			
SPD	0.003	-0.083	<b>0.272</b>	-0.080	0.142	1.000		
RH	-0.067	-0.106	<b>-0.345</b>	-0.115	-0.119	<b>-0.365</b>	1.000	
TMP	0.090	<b>-0.239</b>	-0.096	<b>-0.293</b>	-0.014	-0.140	<b>0.329</b>	1.000
Mugeodong	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	CO	PM <sub>10</sub>	SPD	RH	TMP
SO <sub>2</sub>	1.000							
NO <sub>2</sub>	<b>0.458</b>	1.000						
O <sub>3</sub>	0.165	0.180	1.000					
CO	<b>0.203</b>	0.007	<b>-0.277</b>	1.000				
PM <sub>10</sub>	<b>0.297</b>	<b>0.206</b>	0.132	<b>0.365</b>	1.000			
SPD	-0.028	-0.040	<b>0.467</b>	-0.180	0.058	1.000		
RH	-0.151	0.007	<b>-0.374</b>	0.063	-0.182	<b>-0.404</b>	1.000	
TMP	0.114	<b>0.290</b>	0.105	-0.109	0.019	-0.093	<b>0.329</b>	1.000
Wonsanlee	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	CO	PM <sub>10</sub>	SPD	RH	TMP
SO <sub>2</sub>	1.000							
NO <sub>2</sub>	<b>0.382</b>	1.000						
O <sub>3</sub>	-0.065	<b>-0.202</b>	1.000					
CO	0.149	<b>0.349</b>	-0.030	1.000				
PM <sub>10</sub>	0.142	<b>0.211</b>	0.055	<b>0.217</b>	1.000			
SPD	0.166	-0.014	<b>0.310</b>	0.098	0.055	1.000		
RH	0.009	-0.198	-0.181	<b>-0.225</b>	0.035	<b>-0.207</b>	1.000	
TMP	0.067	<b>-0.318</b>	<b>0.230</b>	<b>-0.340</b>	0.151	-0.060	<b>0.329</b>	1.000

식 (2)를 적용한 각 항목 상호간 및 기상인자간의 상관관계 특성을 나타내었다. 상관관계를 조사한 결과, SO<sub>2</sub>는 NO<sub>2</sub> 및 풍속과 0.250~0.270의 양의 상관관계를 나타내었고, 상대습도와는 음의 상관관계를 나타내어 동절기 화석연료의 연소에 의한 배출원 영향이 큰 것으로 판단되었다. NO<sub>2</sub> 및 CO 역시 연소에 의한 배출오염물질의 특성상 SO<sub>2</sub>, CO 및 PM<sub>10</sub>과 0.210~0.510의 양의 상관관계를 O<sub>3</sub> 및 온도와 음의 상관관계를 나타내었다. O<sub>3</sub>는 풍속 및 온도와 0.200~0.280의 양의 상관관계를 나타내었고, NO<sub>2</sub> 및 상대습도와 음의 상관관계를 나타내어 바람이 비교적 센 고온의 하절기에 습도가 낮은 기상상태에서 오염물질의 농도가 증가하는 것으로 분석되었다. PM<sub>10</sub>은 NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> 및 CO와 0.210~0.390의 양의 상관관계를 나타내었으며, 습도와 약한 음의 상관관계를 나타내었다.

지역별 상관관계를 Table 1에서 확인한 결과, 대송동은 CO를 제외한 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> 및 PM<sub>10</sub>에 큰 상관관계가

있어 이동오염원의 영향이 적고 화석연료의 연소시설이 주된 오염원으로 분석되었다. 부곡동은 PM<sub>10</sub>을 제외하고 항목간에 주된 상관관계가 적어 Fig. 1과 같이 화석연료 연소시설 이외의 시설이 주로 존재하는 것으로 분석되어 인근의 화학공업시설이 위치하는 입지 특성을 간접적으로 나타내었다. 그리고 삼산동은 NO<sub>2</sub>와 CO간에 0.510의 큰 상관관계로 미루어 이 지역은 주로 이동오염원의 영향이 큰 것으로 확인되었다. 무거동과 원산리는 SO<sub>2</sub>와 NO<sub>2</sub>간에 큰 상관관계를 나타내었으며, PM<sub>10</sub>과 CO에서도 상관관계가 높아 화석연료의 연소시설과 이동오염원의 영향을 동시에 받는 것으로 판단되었다.

#### 4. 다중 회귀분석을 이용한 항목별 특성

조사항목별 상관성 분석을 바탕으로 대기오염에 영향을 미치는 기상인자와의 다중회귀분석을 식 (3)을 이용하여 실시한 결과 식 (4)~(8)과 같은 결과를 얻었다.

대부분의 식에서 결정계수는 상당히 낮게 나타났으나, 이는 43,800개의 방대한 자료를 적용하여 실시한 결과로 Hahn<sup>14)</sup>의 결과와 같이 0.01 정도의 낮은 결정계수에서도 유의수준 0.05에서 표준화 회귀계수가 비교적 크게 나타났고, 이러한 결과 기상조건의 종속변수는 오염물질의 농도값에 유의성 있는 영향을 주는 것으로 판단되었다.

SO<sub>2</sub>는 식 (4)와 같이 주로 풍속(SPD)과 온도(TMP)에 주된 영향을 받는 것으로 나타났으며, 이는 Fig. 3과 같이 풍향이 남동풍 및 남서풍이 지배적이고, 풍속이 비교적 강하며 온도가 높은 봄과 초여름에 주로 나타나는 현상으로 확인되었다. 한편, NO<sub>2</sub>와 CO는 각각 식 (5)와 식 (6)과 같이 온도에 음의 기울기를 나타내어 온도가 낮은 겨울철에 난방연료의 사용량 증가로 인해 나타나는 현상으로 분석되었다. O<sub>3</sub>은 식 (7)과 같이 온도와 풍속에 영향을 주로 받는 것으로 나타났으며, 풍속이 비교적 강하고, 온도가 높은 봄과 초여름에 고농도 오존이 관측되는 현상과 동일하게 판단되었다.

PM<sub>10</sub>은 식 (8)과 같이 온도에 양의 영향을 일부 받으나, 상대습도(RH)에 의해 음의 영향을 받는 것으로 나타났으며, Fig. 3과 같이 온도가 비교적 높고 건조한 봄철에 오염도가 증가하는 것으로 판단할 수 있다.

$$SO_2 = 1.829 + 0.305SPD + 0.215TMP + 0.005RH \quad (R^2 = 0.088) \quad (4)$$

$$NO_2 = 20.567 + 0.001SPD - 0.235TMP - 0.047RH \quad (R^2 = 0.030) \quad (5)$$

$$CO = 6.871 + 0.012SPD - 0.113TMP - 0.010RH \quad (R^2 = 0.079) \quad (6)$$

$$O_3 = 22.663 + 0.243SPD + 0.632TMP - 0.203RH \quad (R^2 = 0.147) \quad (7)$$

$$PM_{10} = 45.492 - 0.081SPD + 0.118TMP - 0.150RH \quad (R^2 = 0.014) \quad (8)$$

각 항목간의 다중회귀분석 결과, 대부분의 항목에서

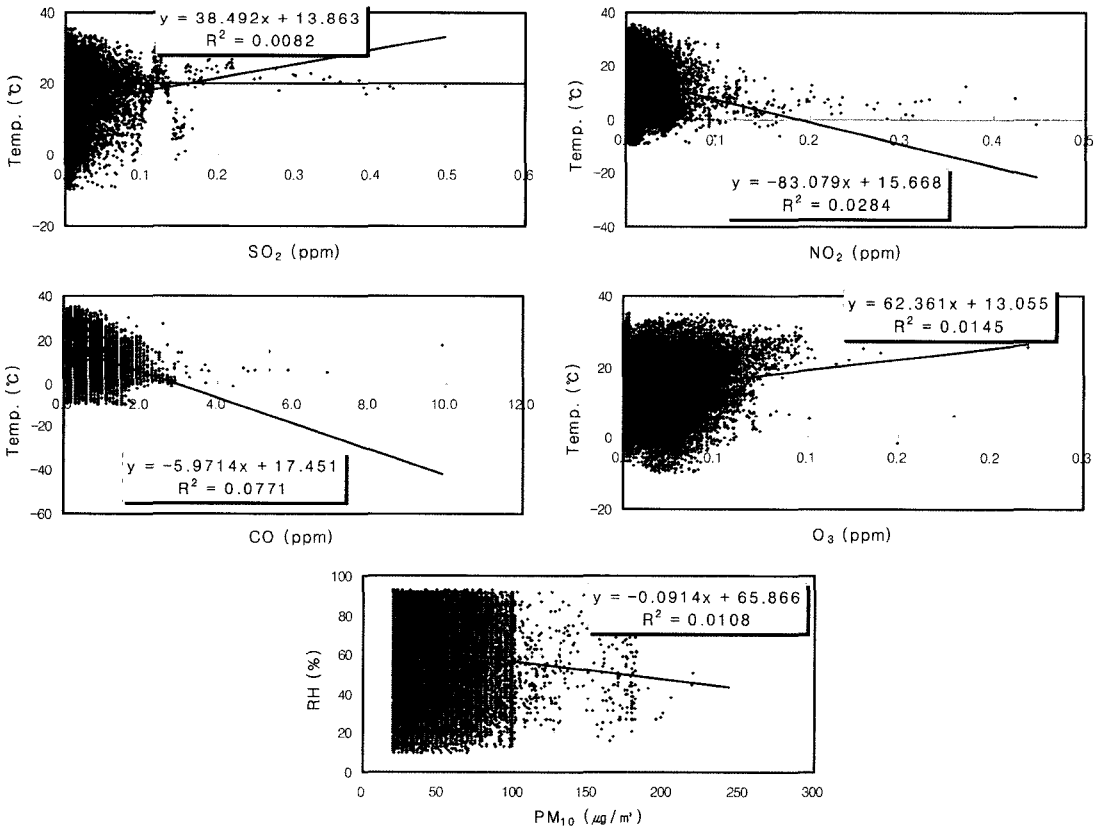


Fig. 5. Regression analysis of each pollutant on temperature and relative humidity in Ulsan.

다소 차이는 있으나 식 (4), (5), (6), (7)과 같이  $SO_2$ ,  $NO_2$ ,  $CO$ ,  $O_3$ 은 공통적으로 온도에 주로 영향을 주로 받는 것으로 확인되어, Fig. 5와 같이 항목별 시간 데이터로서 온도와 단순회귀 상관분석을 실시하였다. 또한 식 (8)과 같이  $PM_{10}$  및 상대습도(RH)의 높은 상관성에서 Fig. 5와 같이 단순회귀 분석을 수행하였으며, 그 결과  $SO_2$ 와  $O_3$ 은 각각 온도와 양의 기울기를 나타내어 온도가 높은 하절기에 오염도가 증가하는 것으로 판단되었다. 반면  $NO_2$ 와  $CO$ 는 온도와 음의 기울기를 나타내어 동절기에 오염도가 증가하는 것으로 판단되었다. Fig. 5는 43,800개 각각의 자료를 이용한 단순회귀분석으로서 낮은 결정계수에서도 유의수준 0.05에서도 표준화 회귀계수가 크게 나타났다. 이러한 경향은 입자상 대기오염 배출물질과 함께 박무 및 안개의 영향도 크게 받는  $PM_{10}$ 은 상대습도와와의 단순회귀 상관관계에서는 음의 상관관계를 나타내어 습도가 비교적 낮은 겨울철 및 봄철에 고농도 분포를 나타내는 것으로 판단되었으며, 동절기에 난방연료 사용량 증가와 함께 화석연료의 연소량의 확대에 의한  $PM_{10}$  오염도 증가와 습도와 음의 상관관계 인자로 사료되었다.

## V. 결 론

울산지역의 대기오염도를 조사하기 위하여 10만개 이상의 시간자료를 바탕으로 pollution-rose를 이용한 발생원 추정, 기상자료 분석 및 상관성평가와 개별 항목간 다중회귀분석을 실시하였다. 이상의 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 울산지역의 계절별 대기오염도 분포 특성에 있어서  $NO_2$ ,  $CO$  및  $PM_{10}$ 은 겨울철 비공업지역(주거지역)의 난방연료 사용에 기인하여 하저동고형 현상을 나타내었으며,  $SO_2$ 는 공업지역의 점오염원에 의한 배출량의 영향으로,  $O_3$ 은 인위적 영향 보다는 봄철 및 여름철의 자연적 영향인 자외선증가, 그리고 해풍에 의한 해안지역의 고농도 발생 등 하고동저 농도분포 특성을 나타내는 것으로 사료된다.
2. 연구 대상지역에 대하여 pollution-rose를 적용한 발생원을 평가한 결과, 무거동은 북쪽 고속도로 이동오염원과 주변의 먼오염원, 대송동은 서쪽의 중공업계열과 남쪽의 석유화학계열, 삼산동은 서쪽의 이동오염원, 부곡동과 원산리는 북서쪽의 대규모 연소 및 소각시설과 공업지역의 영향을 주로 받는 것으로 평가되었다.
3. 항목별 기상인자간의 지역별 상관관계를 분석한 결과, 대송동은  $CO$ 를 제외한  $SO_2$ ,  $NO_2$  및  $PM_{10}$ 에 큰 상관관계가 있어 화석연료의 연소시설이 주된 오염원

으로 분석되었으며, 삼산동은  $NO_2$ 와  $CO$ 간에 0.510의 큰 상관관계로 미루어 주로 이동오염원의 영향이 큰 것으로 판단되었다. 무거동과 원산리는  $SO_2$ 와  $NO_2$ 간에 큰 상관관계를 나타내었으며,  $PM_{10}$ 과  $CO$ 에서 상관관계가 높아 화석연료의 연소시설과 이동오염원의 영향을 동시에 받는 것으로 판단되었다. 이는 전체적으로 pollution-rose를 적용한 발생원 평가와도 일치하였다.

4. 다중 회귀분석을 이용한 울산지역의 대기오염물질 항목별 특성을 조사한 결과,  $SO_2$ 와  $O_3$ 은 주로 풍속과 온도에 영향을 받아 봄과 초여름에 고농도분포를 나타내었으며,  $NO_2$ 와  $CO$ 는 온도와 음의 상관을 나타내어 온도가 낮은 겨울철에 난방연료의 사용량 증가로 인해 나타나는 현상으로 분석되었다.  $PM_{10}$ 은 온도에 양의 영향을 일부 받으나, 상대습도에 의해 음의 영향을 받아 온도가 비교적 높고 건조한 봄철에 오염물질의 농도가 증가하는 것으로 확인되었다.

## 감사의 글

이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었으며(KRF-2005-042-C00174), 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Jung, J. H., Choi, S. G. and Kim, Y. O. : Analysis of atmospheric phenomena and air quality at Gyeongju, Pohang and Ulsan. *Journal of the Environmental Research*, **1**, 31-49, 2001.
2. 정중현, 최석규, 조세환 : 북천지역 자연학습 체험단지 조성을 위한 기본계획(I)-하상분석, 대기질 및 생태분석. *한국환경위생학회*, **28**(2), 23-39, 2002.
3. 정중현 : 중·소형 폐기물소각로 및 배연탈황공정용 홍합(Hard-Shell Mussel) 해양 패각폐기물 Sorbent 적용기법 연구. *한국환경위생학회지*, **29**(1), 34-42, 2003.
4. 정중현, 손병현, 정덕영, 김현규, 이협희 : 폐기물소각로의 유해 대기오염물질 배출 특성. *한국환경위생학회지*, **29**(5), 17-26, 2003.
5. 강병욱, 이학성, 김희강 : 청주지역 산성가스상물질과 미세먼지의 계절변동 특성. *한국대기보전학회지*, **13**(5), 333-343, 1997.
6. Willison, M. J., Clarke, A. G. and Zeki, E. M. : Seasonal variation in atmospheric aerosol concentration and composition at urban and rural sites in Northern England. *Atmospheric Environment*, **19**(7), 1081-1089, 1985.
7. 송덕만, 최정정 : 울산-온산공단 배출가스의 대기오염 예측을 위한 분산모델링. *대한환경공학학회지*, **18**(10), 1217-1225, 1996.
8. 박일수, 이석조, 김종춘, 김상균, 이동원 : 수도권지역

- 에서 오염원별 대기오염농도 기여도 평가. 한국대기환경학회지, **21**(5), 495-505, 2005.
9. 오광중, 광진, 정덕영, 손건태 : 부산지역의 대기오염물질농도와 기상인자의 통계분석. 대한환경공학회지, **20**(9), 1235-1245, 1998.
  10. 정영진, 이동인, 한영호, 이협희 : 기상조건에 따른 부산지역 대기오염물질 농도변화와 예측에 관한 연구. 한국대기보전학회지, **14**(3), 177-189, 1998.
  11. AWS 자료, 기상청, <http://www.kma.go.kr>
  12. Olszyna, K., Luria, J. M. and Meagher, J. F. : The correlation of temperature and rural ozone levels in southeastern U.S.A.. *Atmospheric Environment*, **31**, 3011-3022, 1997.
  13. 임윤규, 김유근, 오인보 : 공단지역의 국지순환이 대기오염물질의 수송과 고농도발생에 미치는 영향. 한국대기환경학회 춘계학술대회 논문집, 411-412, 2003.
  14. Hahn, G. J. : The Coefficient of Determination Exposed, *Chemtech*, October, 609-611, 1973.
  15. Bower, J. S., Stevenson, K. J., Broughton, G. F. J., Lampert, J. E., Sweeney, B. P. and Wilken, J. : Assessing recent surface ozone concentrations in the U.K.. *Atmospheric Environment*, **28**(1), 115-128, 1994.
  16. 신찬기, 한진석, 김윤신 : 대기오염농도와 기상인자의 관련성 연구. 대기보전학회지, **8**(4), 213-220, 1992.
  17. 유은철, 박옥현 : 부산지역 오존 및 이산화질소 농도의 공간분포해석에 따른 대기오염측정망 배치연구. 한국대기환경학회지, **20**(5), 583-591, 2004.
  18. Duc, H., Shannon, I. and Azzi, M. : Spatial distribution characteristics of some air pollutants in Sydney. *Mathematics and Computers in Simulation*, **54**, 1-21, 2000.