

부산광역시 대기 중 PM10 내 중금속 농도 변화 특성 분석

조영대*, 김지원, 최동훈

환경보건팀

The Analysis of Characteristics in PM10 and Airborne Heavy Metal Concentration variation of Busan Metropolitan City

Yeong-Dae Cho Ji-won Kim, Dong-Hun Choi

Environmental Health team

Abstracts

As a result of applying trend analysis to PM10 data collected from the air environment measurement network in Busan for 22 years from January 2002 to December 2023, the annual average PM10 data in industrial, commercial, and residential areas tends to decline and accelerates the decline based on changing points. Seasonal average PM10 data also have a downward tendency, but the presence or absence of changing points and acceleration vary by region.

From January 2014 to December 2023, a principal component analysis(PCA) was conducted using general air quality items, air born heavy metals, and weather data collected from the air environment measurement network in Busan for 10 years, and the dispersion of air quality items was explained in the order of self-contribution, on-road vehicles, and policy impact in industrial areas, followed by commercial on-road vehicles, internal inflow, and external inflow (crust-derived), and residential areas were explained in the order of self-contribution, internal inflow, and on-road vehicles.

Key words : *PM-10, Heavy metal, Trend Analysis, Sen`s slope, Mann-Kendall, Pettit`s test, PCA*

1. 서론

미세먼지(PM-10)는 직경 10 μm 이하의 대기 중 부유하는 물질로 지형과 기상 등의 자연적인 인자와 다양한 인위적 배출원으로부터 발생하며, 물리화학적 구성성분이 지역적으로 다른 특성을 가진다¹⁾. 미세먼지는 기도의 자극, 기침, 폐기능의 저하와 같은 호흡기 관련 질환 일으키는 등 인체에 유해한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다^{2),3)}.

그리고 대기 중 중금속은 분진이나 미세먼지(PM-10)와 같은 입자상물질의 표면에 흡착되어 부유하거나, 2차 및 3차 결합으로 대기 중에 체류하게 된다⁴⁾. 중금속은 다른 물질 대비 자체 독성이 높다는 특성 외에 환경에서 잔류기간이 길며, 생태계에서도 생물농축되어 최종적으로 인체에 적지 않은 위해를 끼치는 물질로 분류되고 있어 특별한 관리가 요구된다⁵⁾. 유해 중금속은 위장과 신장, 혈액 및 신경계에 독성을 가질 뿐만 아니라, 국제암연구소(International Agency of Research on Cancer, IARC)에서는 대기 중 입자상 물질에 포함된 유해중금속을 주요 암유발 성분으로 인식하고 있다⁶⁾. 특히, 미세먼지(PM10)에 함유되어 있는 납, 카드뮴, 크롬, 망간, 니켈, 비소, 아연 등의 중금속이 인체에 흡수되어 활성산소를 생성하는 등 다양한 기전을 통해 호흡기 및 순환기계 질환을 야기할 수 있다^{7),8)}. 또한, 비발암성 중금속도 노출기간과 노출농도에 따라 건강에 피해가 나타날 수 있다. 대기 중에 존재하는 중금속 농도 분포는 지역별 특성(특히, 용도지역) 및 다양한 환경요인에 따라 달라질 수 있다. 중금속 발생의 원인으로는 산업활동에 따른 화학공정, 화석 연료의 연소, 쓰레기 소각, 금속산업, 암석의 풍화작용 외 그 밖의 과정 등을 통한 자연적 발생원과 인위적 발생원에 의해 다양한 경로로 대기 중에 배출된다^{9),10)}. 따라서 해당 지역의 대기중금속 항목별 농도의 분포를 파악하여 어떠한 특성이 있는지 조사하고, 파악된 중금속 항목이 가진 위해성에 대한 연구가 반드시 이루어져야 한다.

한편, 부산지역은 공업단지와 도심지의 분포가 넓고 다양하여 배출원도 다양하게 분포되어 있는 특징이 있

다. 더욱이 시 경계에 대규모 공업도시로 유명한 울산광역시와 위치해 있고 해양도시이자 산악지역인 도시내륙의 지형적 조건이 복잡하여 대기오염에 큰 영향을 미치는 지역적 국지순환계 형태 또한 다양한 규모와 형태로 나타난다¹¹⁾.

본 연구에서는 2013년 미세먼지 문제가 대중에 인식된 후 그동안 용도지역별로 미세먼지(PM10) 발생의 변화를 확인하고, 용도지역별로 다른 대기중금속의 항목별 변동특성을 분석하므로써 시의 효과적인 대기중금속 저감정책 수립의 기초자료로서 활용하고자 대기환경측정망 자료를 대상으로 트렌드 분석 및 주성분 분석을 수행하였다.

2. 연구재료 및 방법

2.1. 연구대상 및 기간

본 연구에서는 부산지역 대기환경측정망 중 도시대기측정망 10개 항목(SO_2 , CO, NO_x , O_3 , PM-10, PM-2.5, 풍향, 풍속, 온도, 습도)과 대기중금속 측정망 12항목(Pb, Cd, Cr, Cu, Mn, Fe, Ni, As, Be, Al, Ca, Mg)을 분석하였다. 그 중 트렌드분석을 위한 PM10 항목은 22년(2002년 ~ 2023년)간의 데이터를 대상으로 하였으며, 연평균 데이터와 계절에 따른 영향을 고려하여 봄(3~4월), 여름(6~8월), 가을(9~10월) 및 겨울(11~2월)로 구분하여 분석하였다.

주성분 분석을 위한 대기중금속 및 일반대기질 항목은 2014~2023년 10년간의 데이터를 대상으로 하였다.

2.2. 연구지점 및 특성

연구지점은 부산시에서 운영하고 있는 대기환경측정소 중 측정의 연속성을 고려하여 분석 대상기간 동안 측정소의 이동이나 측정기기의 변경이 없었던 지점으로 각 용도지역을 대표하는 3곳을 선정하였다. 그 결과 공업지역으로는 사상구의 학장동 측정소가 선정되었고, 상업지역으로는 연제구의 연산동 측정소가, 주거지역으로는 수영구의 광안동 측정소가 최종적으로 선정되었다(Table 1).

Table 1. Information of sampling sites in this study

Area	Sampling site	District	Location	Land type
Heavy metal monitoring system	Hakjang-dong (HJ)	Sasang-gu	Busan Hakjang elementary school	Industrial
	Gwangan-dong (GA)	Suyeong-gu	Busan Hanbada Middle School	Residential
	Yeonsan-dong (YS)	Yeonje-gu	Busan Metropolitan City-hall	Commercial

3. 시료채취 방법 및 분석

대기중금속 측정망 시료채취는 하이볼륨샘플러 (Micro PNS HVS-16, MCS, Germany)로 1,130 L/min의 유량으로 매일 7일간, 24시간 연속 채취하였고, 중량농도 및 중금속 성분 분석을 위해 15 cm 석영 여지(QFH 150, Hahnemuehle, Germany)를 사용하였다. 여지는 시료채취 전·후 항온 및 항습 조건이 유지되도록 24시간 동안 데시케이터 내에 보관한 뒤 0.1 µg까지 측정할 수 있는 저울(ME5-F, Satorius, Japan)로 무게를 측정하였다.

중금속분석은 대기오염공정시험기준을 참고하여 석영 여지를 전용커터를 사용해 1/4로 절단해서 뚜껑이 있는 100 mL Pyrex 유리병에 넣고 1.0M 질산과 2.23M 염산 혼합액(1:1)을 30 mL 가한 초음파 추출기 (BC-1200W, BOSCO, Korea)에서 28 kHz로 100 °C 2시간 추출하고 식힌 후 5A 여지로 여과한 뒤 최종액량 100 mL가 되도록 하였다. 이 시료는 ICP-OES(Varian 720-ES, USA)를 사용하여 중금속 농도를 분석하였다.

3.1. 트렌드분석(Trend Analysis)

3.1.1. Mann-Kendall 검정

Mann-Kendall 검정은 세계기상기구(World meteorological organization)가 기상자료의 경향성 분석을 수행할 때 권장하는 방법으로, 검정에 사용되는 데이터의 정규성을 요구하지 않는 비모수적 검정방법이나¹²⁾ 시계열 자료 X_t ($t = 1, 2, 3, \dots, n$)에 $t' = 1, 2, \dots, n$ 과 $t = t' + 1, \dots, n$ 시점의 X_t 에 대한 크기 비교를 통해 경향성의 존재 유무 및 경향의 방향성(상승 경향, 하강 경향, 무경향)을 식 (1.1)의 지시자(indicator) $sgn(X_t - X_{t'})$ 을 이용하여 나타낸다.

$$sgn(X_t - X_{t'}) = \begin{cases} 1, & \text{if } X_t > X_{t'}, \\ 0, & \text{if } X_t = X_{t'}, \\ -1, & \text{if } X_t < X_{t'}. \end{cases} \quad (1.1)$$

그리고 식(1.1)을 이용하여 Kendall 통계량 S 를 식 (1.2)와 같이 정의한다

$$S = \sum_{t'=1}^{n-1} S_{t'} = \sum_{t'=1}^{n-1} \sum_{t=t'+1}^n sgn(X_t - X_{t'}). \quad (1.2)$$

이때 S 의 분산은 식 (1.3)과 같이 주어진다. m 은 데

이터 사계절로 분할하여 구성한 경우를 예로 들어 4개의 그룹으로 나눌 수 있는 것과 같이, 분석 범위에서의 그룹의 개수를 나타낸다.

$$Var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-2)(2t_i+5)}{18}. \quad (1.3)$$

표본의 수 n 이 10보다 클 때 ($n > 10$), S 와 $Var(S)$ 를 이용하여 표준정규분포를 따르는 검정통계량 Z 를 다음의 식 (1.4)와 같은 정의할 수 있다.

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}}, & S > 0, \\ 0, & S = 0, \\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}}, & S < 0. \end{cases} \quad (1.4)$$

결론적으로 Mann-Kendall 검정에서는 식(1.4)의 검정통계량 Z 를 이용하여 시계열 자료에 경향성이 존재하는지를 검정할 수 있으며, 검정통계량값의 부호에 따라 경향의 방향성 또한 표현 가능하다. 본 연구에서는 Mann-Kendall 검정을 분석대상 전 지점의 연평균 및 계절평균 PM10(미세먼지) 자료에 적용하여 연평균, 및 계절평균 경향성을 분석하였다.

3.1.2. Sen's slope

Sen's Slope 방법은 Sen (1968)이 제안한 추세 기울기 정도를 평가하는 비모수적 방법으로, 추세 기울기의 추정을 위해 선형모델을 사용한다. 식(2.1)와 같이 정의 되는 잔차 분산 Q_i 를 이용하여 중앙값 Q_{med} 를 구한 뒤 이 값을 Sen's Slope 추정값으로 사용한다. 중앙값 Q_{med} 는 식(2.2)과 같이 정의할 수 있다.

$$Q_i = \frac{X_t - X_{t'}}{t - t'} \quad (2.1)$$

$$Q_{med} = \begin{cases} \frac{Q_{\frac{n+1}{2}}}{2}, & \text{if } n \text{ is odd} \\ \frac{Q_{\frac{n+2}{2}} + Q_{\frac{n+1}{2}}}{2}, & \text{if } n \text{ is even} \end{cases} \quad (2.2)$$

3.1.3. Pettit 검정

Pettit 검정은 자료의 분표를 가정하지 않고 시계열 자료의 변동점(Change Point) 존재 여부를 검정하는 비모수적 검정 방법이다. 전체 T 시점의 시계열 자료

에 대해 특정 t 시점이 변동점인지를 검정하기 위해 시계열 관측값의 순위(rank)를 이용하여 식 (3.1)과 같은 통계량 $U_{t,T}$ 를 계산한다. 각 시점의 $U_{t,T}$ 중 최대값을 식 (3.2)과 같이 Pettit 검정통계량 K_T 로 정의한다. 또한 유의확률 P 는 식 (3.3)과 같이 계산할 수 있다.

$$U_{t,T} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=i+1}^T \text{sgn}(X_i - X_j), \quad (3.1)$$

$$K_T = \max |U_{t,T}|, \quad (3.2)$$

$$P \simeq 2 \exp \left(\frac{-6K_T^2}{T^3 + T^2} \right) \quad (3.3)$$

검정결과 유의하게 나타난 t 시점을 자료의 변동점으로 판단할 수 있다. 본 연구에서는 Pettit 검정을 통해 미세먼지 자료에 존재하는 유의한 변동점을 탐색하였으며, 탐색된 변동점을 기준으로 시계열 자료를 각각 전반부와 후반부로 구분한 뒤, 구분된 각 구간의 Sen's slope를 계산하여 변동점 전후의 경향성 정도를 비교 분석하였다.

3.2. 주성분분석(Principal Component Analysis)을 통한 차원 축소

주성분분석은 1901년도에 피어슨(Karl Pearson)에 의해 제안되었으며, 1930년대에 Harold Hotelling에 의해 독자적으로 발전됐다. 이는 고차원의 데이터를 저차원의 데이터로 환원시키는 기법으로서 예측모델을 구축하거나 데이터의 탐색 및 분석의 도구로서 사용되었다. 주성분분석은 서로 연관 가능성이 있는 고차원 표본들을 선형연관성이 없는 저차원 공간(주성분)의 표본으로 변환하기 위해 직교 변환을 사용한다. 주성분의 차원수는 원래 표본의 차원 수보다 작거나 같다. 데이터를 한 개의 축으로 사상시켰을 때, 그 분산이 가장 커지는 축을 첫 번째 주성분, 두 번째로 커지는 축을 두 번째 주성분으로 놓도록 새로운 좌표계로 선형 변환한다.

데이터 집합의 전체 평균이 0이라고 가정하면, 데이터 집합 x 의 주성분 w_1 은 방정식 (4.1)과 같이 정의된다.

$$w_1 = \arg \max_{\|W\|=1} E\{(w^T x)^2\} \quad (4.1)$$

방정식 (4.2)에서와 같이, $k-1$ 개의 주성분이 이미 주어져 있을 때 k 번째 주성분은 앞의 $k-1$ 개 주성분을 제외함으로서 찾을 수 있다.

$$\hat{x}_k = x - \sum_{i=1}^{k-1} w_i w_i^T x \quad (4.2)$$

이후 방정식 (4.3)에서와 같이, 이 값을 데이터 집합에서 제외한 다음 주성분을 새로 찾는다.

$$w_k = \arg \max_{\|W\|=1} E\{(w^T \hat{x}_k)^2\} \quad (4.3)$$

따라서 방정식 (4.4)에서와 같이 카루엔-뢰브 변환은 데이터 행렬 X 의 특잇값 분해를 찾는 다음, 방정식 (4.5)와 같이 X 를 L 개의 특이 벡터와 W_L 로 정의된 부분공간으로 사상시켜 부분 데이터 집합 Y 를 찾는 것과 같다. X 의 특잇값 벡터 행렬 W 는 공분산 $C=XX^T$ 의 고유 벡터 행렬 W 와 동일하다(방정식(4.6)). 가장 큰 고유값을 갖는 고유 벡터는 데이터 집합에서 가장 강한 상관성을 갖는 차원에 대응된다.

$$X = W \Sigma V^T \quad (4.4) \quad Y = W_L^T X = \Sigma_L V_L^T \quad (4.5)$$

$$XX^T = W \Sigma^2 W^T \quad (4.6)$$

4. 연구결과

4.1. 트렌드분석

4.1.1. 공업지역

22년간(2002년~2023년) 수집된 공업지역(학장동)의 연평균 PM10 시계열 자료에 대해 Mann-Kendall 검정을 수행한 결과 Table 1에서와 같이 하락 경향성이 존재하는 것으로 나타났다. 또한 경향성 정도를 파악하기 위해 Sen's slope 값을 계산한 결과 -2로 나타났다. 즉, 공업지역의 최근 22년간 연평균 PM10 시계열 자료로부터 평균 PM10이 연간 약 $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 감소하는 경향성이 있다는 것을 알 수 있다. Figure 1은 Sen's slope를 이용하여 22년간 연평균 PM10 자료에 대한 경향성을 시각화한 것으로 뚜렷한 하락 경향성을 확인할 수 있다. 변동점 유무를 파악하기 위해 Pettit 검정을 수행한 결과 2013년이 변동점으로 탐색되었으며, 변동점을 기준으로 자료를 전반부 후반부로 나누어 Sen's slope를 살펴보면, 변동점인 2013년 이전

Table 2. Trend analysis using annual average PM10 data(Hakjang-dong)

Period	Kendall S	Z-statistic	P-value	Trend	Sen's slope	Change Point	Sen's slope before changepoint	Sen's slope after changepoint
2002 ~ 2023	1245	-0.828	< 0.05	downward	-2.000	2013	- (> 0.05)	-2.667

은 유의수준을 넘지 못하였고(> 0.05) 이후에는 -2.667로 전체 기간 기율기보다 하락 경향성이 강한 것으로 나타났다.

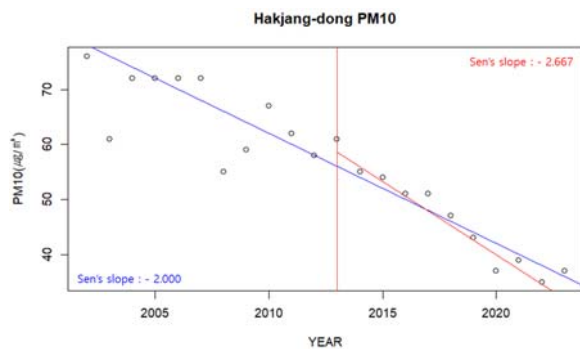


Fig 1. Annual average PM10 and its Sen's slope(Hakjang-dong).

공업지역의 계절 평균 시계열 자료에 대해 Mann-Kendall 검정을 수행한 결과 Table 1-1에 나타난 바와 같이 사계절에서 하락 경향성이 존재하는 것을 알 수 있다. Sen's slope를 이용해 하락 경향성 정도를 계산해 보면 봄의 경우 -2.067, 여름의 경우 -2.000, 가을의 경우 -2.222, 겨울의 경우 -1.433으로 전체적으로 비슷한 하락 정도를 보이나 겨울의 하락 경향성이 다른 계절에 비해 낮은 것을 알 수 있었다. 사계절 자료의 경향성에 대해 변동점 유무를 파악하기 위해 Pettit 검정을 수행하였다. 그 결과 봄의 경우 2014년이 변동점으로 탐색되었으며, 여름은 2015년, 가을과 겨울은 2012년으로 탐색되었다. 또한 계절별

로 탐색된 변동점을 기준으로 평균 PM10의 하락 경향의 변화 정도를 비교분석해 보았다.

변동점을 기준으로 자료를 전반기 및 후반기로 나눈 Sen's slope를 살펴보면, 사계절 모두 변동점 전은 유의수준을 넘지 못하여 특정한 경향성을 가지지 않았다. 그리고 변동점 이후를 탐색해 보면, 봄의 경우 변동점인 2014년 이후에는 -2.067로 하락 경향성이 전체 경향성과 동일했다. 여름의 경우 변동점 이후 -2.794로 전체 경향성보다 하락 경향이 강해졌으며, 가을의 경우 변동점인 2012년 -2.292로 전체 경향성보다 하락 경향성이 유사했다. 겨울의 경우 또한 변동점 이후에 -2.302로 전체 경향성보다 하락 경향이 강해졌다. 각 계절의 평균기온 자료와 탐색된 변동점 전후의 Sen's slope를 이용한 시각화 결과가 Figure 1-1 ~ 1-4에 나타나 있다.

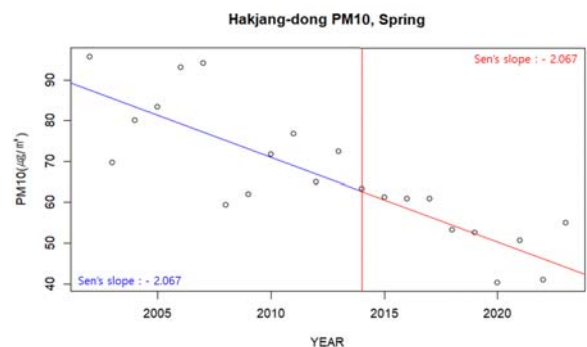


Fig 1-1. Seasonal average PM10 and its Sen's slope(Hakjang-dong, Spring).

Table 2-1. Trend analysis using seasonal average PM10 data(Hakjang-dong)

Period	Z-statistic	P-value	Sen's slope	Trend	Change Point	Sen's slope before changepoint	Sen's slope after changepoint
Spring (Mar.~May.)	-4.3724	< 0.05	-2.067	downward	2014	- (> 0.05)	-2.067
Summer (Jun.~Aug.)	-3.9242	< 0.05	-2.000	downward	2015	- (> 0.05)	-2.794
Autumn (Sep.~Nov.)	-5.3576	< 0.05	-2.222	downward	2012	- (> 0.05)	-2.292
Winter (Dec.~Feb.)	-4.9103	< 0.05	-1.433	downward	2012	- (> 0.05)	-2.302

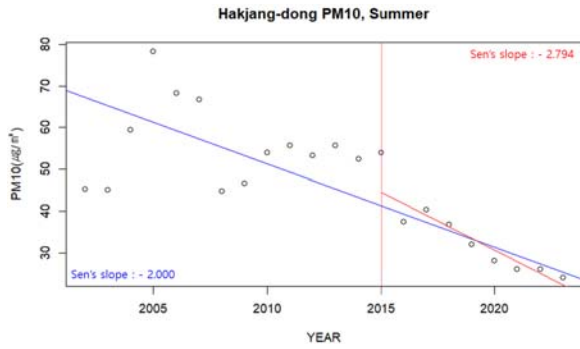


Fig 1-2. Seasonal average PM10 and it's Sen's slope(Hakjang-dong, Summer).

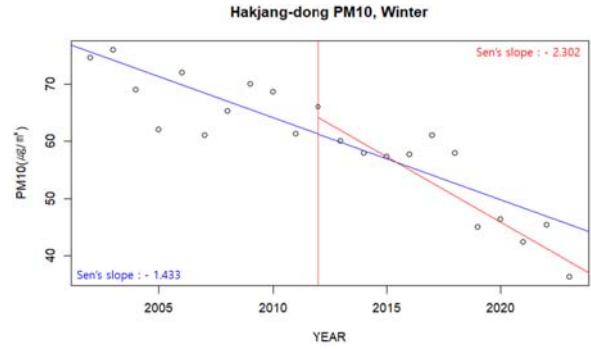


Fig 1-4. Seasonal average PM10 and it's Sen's slope(Hakjang-dong, Autumn).

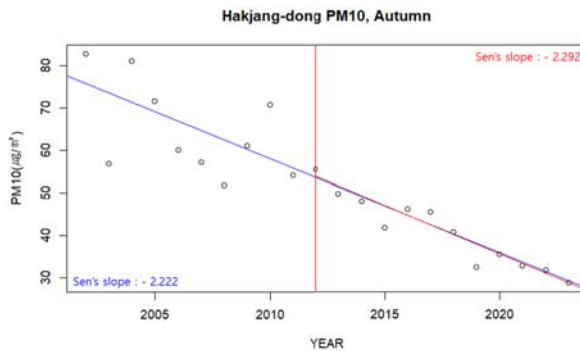


Fig 1-3. Seasonal average PM10 and it's Sen's slope(Hakjang-dong, Autumn).

4.1.2. 상업지역

22년간(2002 ~ 2023) 수집된 상업지역(연산동)의 연평균 PM10 시계열 자료에 대해 Mann-Kendall 검정을 수행한 결과 Table 2에서와 같이 하락 경향성이 존재하는 것으로 나타났다. 또한 경향성 정도를 파악하기 위해 Sen's slope 값을 계산한 결과 -1.125로 나타났다. 즉 공업지역의 최근 22년간 연평균 PM10 시계열 자료로부터 평균 PM10이 연간 약 $-1.125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 감소하는 경향성이 있다는 것을 알 수 있다. Figure 2는 Sen's slope를 이용하여 22년간 연평균 PM10 자료에 대한 경향성을 시각화한 것으로 뚜렷한 하강 경향성을 확인할 수 있다. 변동점 유무를 파악하기 위해 Pettit 검정을 수행한 결과 2017년이 변동점으로 탐색되었으며, 변동점을 기준으로 자료를 전반부 후반부로 나

Table 3. Trend analysis using yearly average PM10 data(Yeonsan-dong)

Period	Kendall S	Z-statistic	P-value	Trend	Sen's slope	Change Point	Sen's slope before changepoint	Sen's slope after changepoint
2002 ~ 2023	-143	-4.018	< 0.05	downward	-1.125	2017	-0.500	-3.250

Table 3-1. Trend analysis using seasonal average PM10 data(Yeonsan-dong)

Period	Z-statistic	P-value	Sen's slope	Trend	Change Point	Sen's slope before changepoint	Sen's slope after changepoint
Spring (Mar.~May.)	-3.6954	< 0.05	-1.226	downward	2016	-	-
Summer (Jun.~Aug.)	-3.8913	< 0.05	-1.444	downward	2009	-	-1.917
Autumn (Sep.~Nov.)	-4.0339	< 0.05	-1.103	downward	2017	-0.750	-2.667
Winter (Dec.~Feb.)	-2.2558	< 0.05	-0.833	downward	2017	-	-4.167

누어 Sen's slope를 살펴보면, 변동점인 2017년 이전에는 -0.500에서 이후에는 -3.250으로 하락 경향성이 급격히 강해졌다.

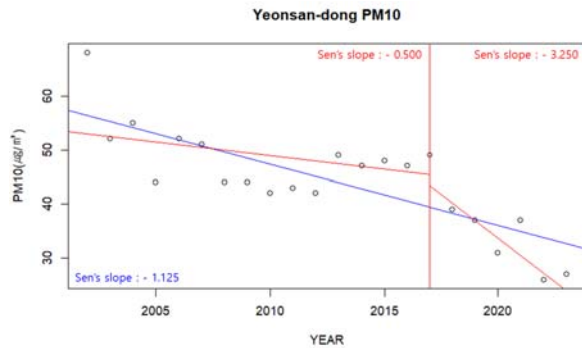


Fig 2. Annual average PM10 and its Sen's slope(Yeonsan-dong).

상업지역의 계절 평균 시계열 자료에 대해 Mann-Kendall 검정을 수행한 결과 Table 2-1에 나타난 바와 같이 사계절에서 하락 경향성이 존재하는 것을 알 수 있다. Sen's slope를 이용해 하강 경향성 정도를 계산해 보면 봄의 경우 -1.226, 여름의 경우 -1.444, 가을의 경우 -1.103, 겨울은 -0.833으로 봄과 여름의 하락 경향성이 상대적으로 크고 겨울은 작은 것을 알 수 있었다.

사계절 자료의 경향성에 대해 변동점 유무를 파악하기 위해 Pettit 검정을 수행하였다. 그 결과 봄의 경우 2016년이 변동점으로 탐색 되었으며, 여름은 2009년, 가을과 겨울은 2017년으로 탐색 되었다. 또한 계절별로 탐색된 변동점을 기준으로 평균 PM10의 하락 경향의 변화 정도를 비교분석해 보았다. 변동점을 기준으로 자료를 전반부 후반부로 나누어 Sen's slope를 살펴보면, 봄의 경우 변동점 전후 Sen's slope는 유의수준을 넘지 못하였다. 여름의 경우 변동점인 2009년 이전의 Sen's slope는 유의수준을 넘지 못하였으나 이후로는 -1.917로 하락경향성이 나타났다. 가을의 경우 변동점인 2017년 이전에는 -0.750에서 이후에는 -2.667로 하락 경향성이 강해졌다. 겨울의 경우 변동점인 2017년 이전의 Sen's slope는 유의 수준을 넘지 못하였으나 이후로는 -4.167로 강한 하락 경향성이 나타났다. 각 계절의 평균기온 자료와 탐색된 변동점 전후의 Sen's slope를 이용한 시각화 결과가 Figure 2-1 ~ 2-4 에 나타나 있다.

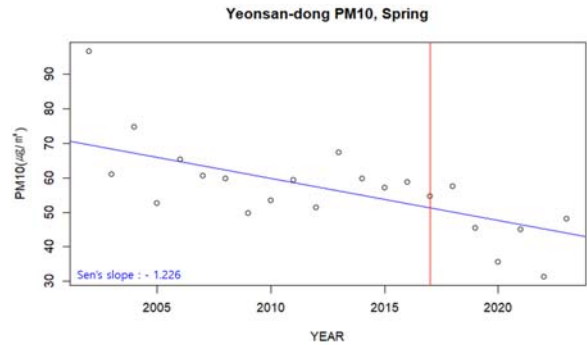


Fig 2-1. Seasonal average PM10 and its Sen's slope(Yeonsan-dong, Spring).

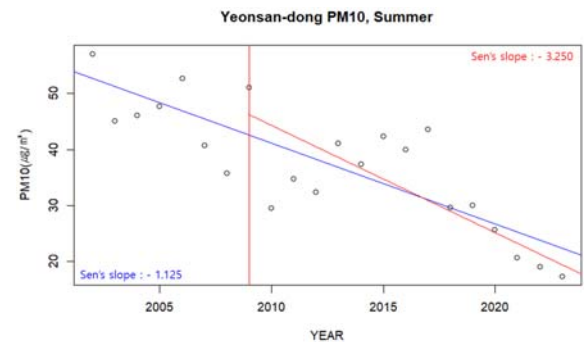


Fig 2-2. Seasonal average PM10 and its Sen's slope(Yeonsan-dong, Summer).

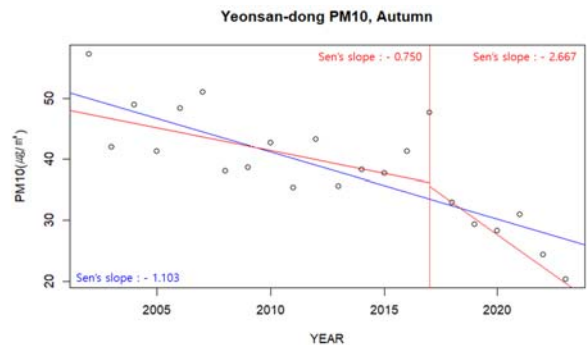


Fig 2-3. Seasonal average PM10 and its Sen's slope(Yeonsan-dong, October).

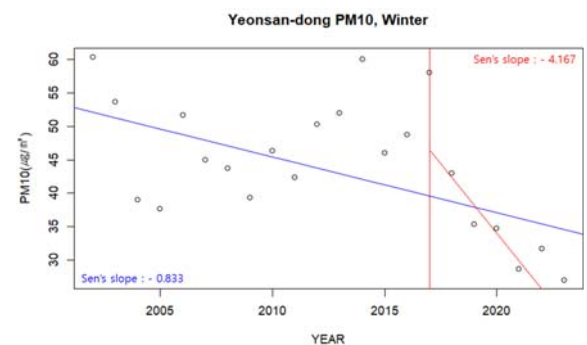


Fig 2-4. Seasonal average PM10 and its Sen's slope(Yeonsan-dong, Winter).

4.1.3. 주거지역

22년간(2002~2023) 수집된 주거지역(광안동)의 연평균 PM10 시계열 자료에 대해 Mann-Kendall 검정을 수행한 결과 Table 1에서와 같이 하락 경향성이 존재하는 것으로 나타났다. 또한 경향성 정도를 파악하기 위해 Sen's slope 값을 계산한 결과 -0.923 으로 나타났다. 즉 주거지역의 최근 22년간 연평균 PM10 시계열 자료로부터 평균 PM10이 연간 약 $-0.923 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 감소하는 경향성이 있다는 것을 알 수 있다. Figure 3은 Sen's slope를 이용하여 22년간 연평균 PM10 자료에 대한 경향성을 시각화한 것으로, 뚜렷한 하강 경향성을 확인할 수 있다. 변동점 유무를 파악하기 위해 Pettit 검정을 수행한 결과 2009년이 변동점으로 탐색되었으며, 변동점을 기준으로 자료를 전반부 후반부로 나누어 Sen's slope를 살펴보면, 변동점 전후 Sen's slope는 유의수준을 넘지 못하였다.

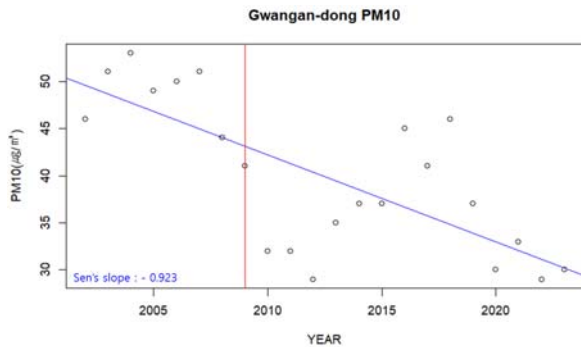


Fig 3. Annual average PM10 and it's Sen's slope(Gwangan-dong).

Table 4. Trend analysis using yearly average PM10 data(Gwangan-dong)

Period	Kendall S	Z-statistic	P-value	Trend	Sen's slope	Change Point	Sen's slope before changepoint	Sen's slope after changepoint
2002 ~ 2023	-112	-3.1421	< 0.05	downward	-0.923	2009	- (> 0.05)	- (> 0.05)

Table 4-1. Trend analysis using seasonal average PM10 data(Gwangan-dong)

Period	Z-statistic	P-value	Sen's slope	Trend	Change Point	Sen's slope before changepoint	Sen's slope after changepoint
Spring (Mar.~May.)	-2.6506	< 0.05	-1.070	downward	2008	-	-
Summer (Jun.~Aug.)	-3.7251	< 0.05	-1.583	downward	2009	-	-
Autumn (Sep.~Nov.)	-3.6755	< 0.05	-0.956	downward	2009	-1.000	-
Winter (Dec.~Feb.)	-1.6126	> 0.05	-	-	-	-	-

주거지역의 계절 평균 시계열 자료에 대해 Mann-Kendall 검정을 수행한 결과 Table 2에 나타난 바와 같이 유의수준을 넘지 못한 겨울을 제외한 모든 계절에서 하락 경향성이 존재하는 것을 알 수 있다. Sen's slope를 이용해 하강 경향성 정도를 계산해 보면 봄의 경우 -1.070 , 여름의 경우 -1.583 , 가을의 경우 -0.956 으로 여름의 하락 경향성이 다른 계절에 비해 큰 것을 알 수 있었다.

사계절 자료의 경향성에 대해 변동점 유무를 파악하기 위해 Pettit 검정을 수행하였다. 그 결과 봄의 경우 2008년이 변동점으로 탐색 되었으며, 여름과 가을은 2009년으로 탐색 되었다.

또한, 계절별로 탐색된 변동점을 기준으로 평균 PM10의 하락 경향의 변화 정도를 비교분석해 보았다. 변동점을 기준으로 자료를 전반부 후반부로 나누어 Sen's slope를 살펴보면, 봄과 여름은 변동점 전후로 유의수준을 넘지 못하였다. 가을의 경우 변동점인 2009년 이전에는 -1.000 이었으나 이후에는 유의 수준을 넘지 못하였다. 각 계절의 평균기온 자료와 탐색된 변동점 전후의 Sen's slope를 이용한 시각화 결과가 Figure 3-1 ~ 3-4 에 나타나 있다.

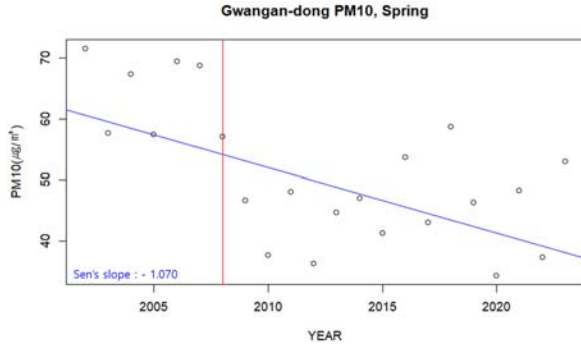


Fig 3-1. Seasonal average PM10 and its Sen's slope(Gwangsan-dong, Spring).

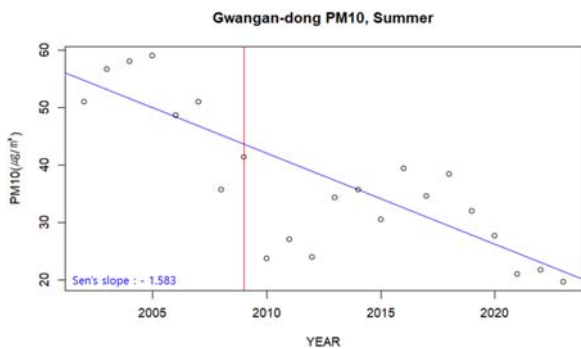


Fig 3-2. Seasonal average PM10 and its Sen's slope(Gwangsan-dong, Summer).

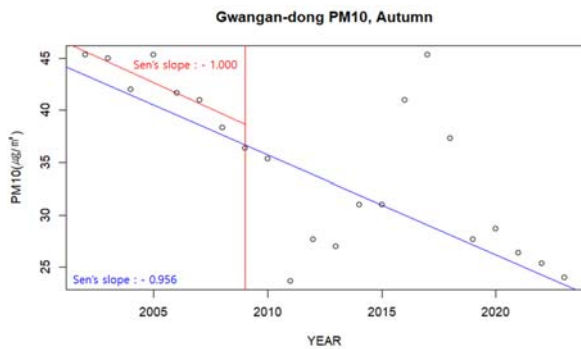


Fig 3-3. Seasonal average PM10 and its Sen's slope(Gwangsan-dong, Autumn).

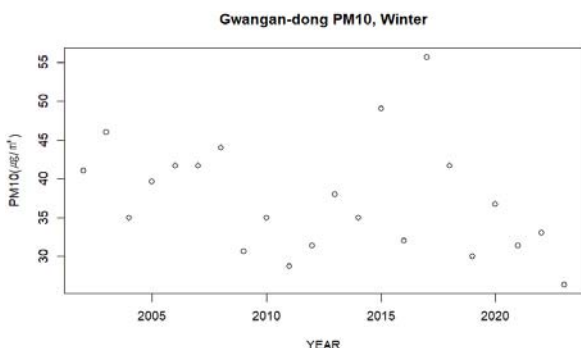


Fig 3-4. Seasonal average PM10 and its Sen's slope(Gwangsan-dong, Winter).

4.2. 주성분 분석

4.2.1. 공업지역

10년간 축적된(2014~2023) 대기중금속 측정망과 일반대기질 측정망의 28개 변수를 선형변환하여 주성분 분석을 이용한 차원축소를 실시하였다. 추출할 주성분의 개수를 선정하기 위해 공업지역 측정망 데이터의 병렬분석(Parallel analysis) 결과 스크리도표(Scree plots)에서 고유값(Eigenvalue)이 1보다 큰 주성분 수를 확인한 결과 Fig 4-1 과 같이 적절한 주성분 수는 7개로 나타났다.

주성분의 구조가 보다 명확하게 드러나도록 주성분의 직각 회전(Orthogonal rotation)을 실시하였으며 그 결과는 Table4-1과 같다. 7개 주성분의 누적 분산 설명력은 73%이므로 70~80% 정도의 분산 설명력을 충족하고 있다.

주성분 분석 결과에 따라 각 주성분을 명명할 경우, RC1은 PM10과 Cr, Ni, Mn과 같은 인위적 배출원에 의한 기타미량금속들이 한 그룹을 형성하며 전체 분산의 21%를 설명하고, 이를 보았을 때 같은 그룹에 속한 Fe, Al, Ca, Mg 항목을 포함하여 도금·주물공장이 다수 위치한 학장동의 “자체 발생원”에 의한 것으로 추정된다. RC2의 경우 주로 NOx, O3 발생과 관련된 것으로 “도로이동오염원”에 의한 것으로 추정되며 전체 분산의 15%를 설명한다. RC3의 경우 년도와 음의 상관관계를 갖는 SOx가 한 그룹을 형성하며 전체 분산의 9%를 설명하는데, 이는 부산시가 지속적으로 추진해온 “환경개선정책”의 효과와 관련된 것으로 추정되고 RC4의 경우 풍향과 중금속(Cd, Pb, As)이 한 그룹을 형성하며 전체 분산의 5%를 설명하는데 이는 “외부유입”에 의한 것으로 추정된다. 공업지역의 경우 주성분의 성질이 명확하게 파악되는 경향이 있다.

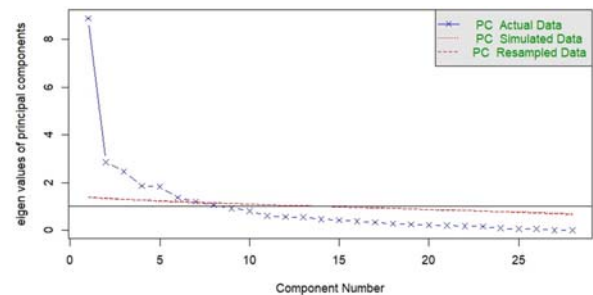


Fig 4-1. Parallel Analysis with Scree plots(PCA, hakjang-dong)

Table 5-1. Principal Components Analysis(Hakjang-dong)

	RC1	RC2	RC3	RC5	RC4	RC6	RC7
year	-0.02	-0.11	-0.8	0.08	-0.12	-0.17	0.14
month	-0.13	0.28	-0.03	0.42	0.12	-0.33	-0.39
Pb	0.3	0.22	0.49	-0.11	0.59	0.03	0.12
Cd	-0.01	0.2	0.15	0	0.8	0.05	0.07
Cr	0.72	0.32	0.33	0.27	-0.14	-0.02	0.16
Cu	0.4	0.3	0.32	0	0.12	0.04	0.53
Mn	0.72	0.41	0.3	-0.09	-0.12	-0.01	0.19
Fe	0.78	0.38	0.25	-0.11	-0.04	0.01	0.12
Ni	0.71	0.26	0.3	0.3	-0.18	0.03	0.12
As	0.11	-0.04	-0.04	0.04	0.75	0	0.02
Be	0.11	-0.03	-0.16	-0.06	0.1	0.04	0.75
Al	0.8	-0.05	-0.23	-0.31	0.11	-0.02	0.01
Ca	0.81	0.19	-0.1	-0.34	0.23	0.05	0.02
Mg	0.84	-0.09	-0.07	-0.17	0.14	-0.11	0.02
O3	0.14	-0.79	-0.06	0.01	0.1	0.22	-0.12
NO2	0.29	0.76	-0.03	-0.1	0.12	0.29	-0.11
NO	0.29	0.82	0.11	-0.04	0.07	0.09	0.01
NOX	0.31	0.87	0.06	-0.07	0.1	0.19	-0.04
SO2	0.26	0.23	0.71	-0.16	0.14	0.31	-0.05
CO	0.32	0.48	0.11	-0.13	0.17	0.35	0.03
PM10	0.74	0.19	0.2	-0.3	0.16	0.38	-0.02
PM25	0.52	0.26	0.26	-0.17	0.16	0.68	0.01
PM25/PM10	-0.3	0.11	0.1	0.22	0	0.8	0.06
Temp	-0.06	-0.41	-0.05	0.71	0.2	0.04	-0.26
WD	0.18	0.2	-0.06	-0.27	-0.36	-0.09	0.16
WS	-0.03	-0.52	0.69	-0.01	-0.03	-0.24	0.07
humi	-0.2	-0.04	-0.2	0.84	0.05	0.11	-0.01
Pre	-0.15	0	-0.02	0.41	-0.15	-0.09	0.3

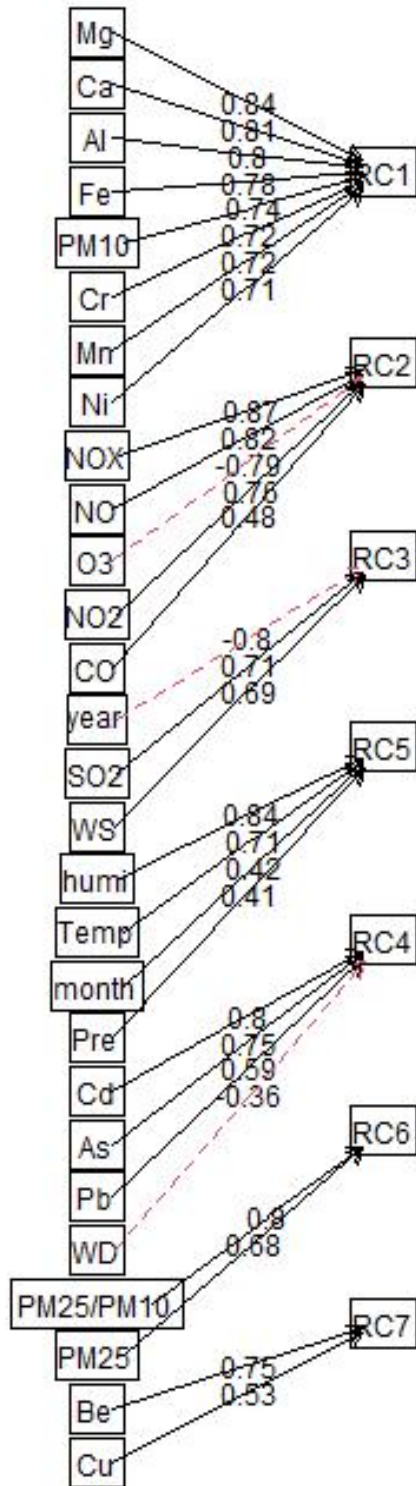


Fig 4-2. PCA diagram(Hakjang-dong)

4.2.2. 상업지역

10년간 축적된(2014~2023) 대기중금속 측정망과 일반대기질 측정망의 28개 변수를 선형변환하여 주성

분 분석을 이용한 차원축소를 실시하였다. 추출할 주성분의 개수를 선정하기 위해 공업지역 측정망 데이터의 병렬분석(Parallel analysis) 결과 스크리도표(Scree plots)에서 고유값이 1보다 큰 주성분 수를 확인한 결과 적절한 주성분 수는 7개로 나타났다.

주성분의 구조가 보다 명확하게 드러나도록 주성분의 직각 회전(Orthogonal rotation)을 실시하였으며 그 결과는 Fig 4-3 과 같다. 7개 주성분의 누적 분산 설명력은 74% 이므로 70~80% 정도의 분산 설명력을 충족하고 있다.

주성분 분석의 결과에 따라 각 주성분을 명명할 경우, RC2의 경우 주로 NOx, O3 발생과 관련된 것으로 “도로이동오염원”에 의한 것으로 추정되며 전체 분산의 16%를 설명하고 이는 공업지역에서도 동일한 모습을 보여주었다. RC1은 PM10, PM2.5와 Ni, Mn, Cr과 같이 일반적으로 부산시 역내 공업단지에서 발생하는 물질과 한 그룹을 형성함으로써 “내부유입”에 의한 것으로 추정되며 전체 분산의 15%를 설명한다. RC6과 RC3은 중금속으로 이루어진 공통점이 있으나, RC6의 경우 주로 지각유래금속인 Fe, Al, Ca, Mg로 이루어진 반면, RC3은 Cd, Pb, As와 같은 기타미량금속으로 이루어짐을 알 수 있다. 이는 도시공원에 위치하여 미세먼지 및 중금속의 자체적 발생원이 없는 연산동 측정소의 특성을 고려할 경우, 각각 다른 원인의 “외부유입”으로 추정되며 각각 RC6은 13%, RC3는 10%의 분산을 설명한다.

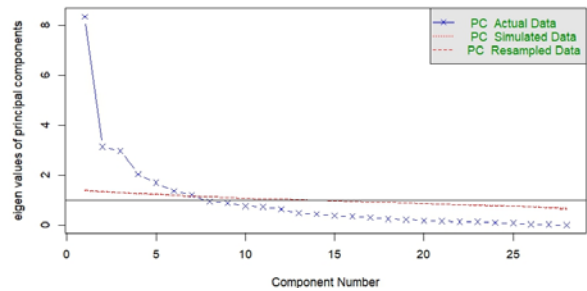


Fig 4-3. Parallel Analysis with Scree plots(PCA, Yeonsan-dong)

Table 5-2. Principal Components Analysis(Yeonsan-dong)

	RC2	RC1	RC6	RC3	RC4	RC5	RC7
year	-0.09	-0.25	0.13	-0.02	-0.83	0.09	0.03
month	0.1	-0.03	-0.13	-0.05	-0.1	-0.74	0.05
Pb	0.09	0.21	0.03	0.88	0.17	0.07	-0.06
Cd	0	-0.02	0	0.93	-0.01	0	0.07
Cr	0.17	0.6	0.18	-0.09	-0.34	0.02	-0.02
Cu	0.59	0.51	0.13	0.46	-0.05	-0.11	-0.03
Mn	0.32	0.64	0.39	0.15	0	0.01	-0.16
Fe	0.3	0.61	0.63	0.1	-0.05	0.09	-0.17
Ni	0.17	0.84	0.13	0.02	0.03	-0.17	0.11
As	-0.03	0.05	0.04	0.84	-0.06	-0.01	-0.05
Be	0.03	0.08	0.46	-0.06	-0.16	0.43	0.25
Al	0.06	0.33	0.83	-0.01	-0.03	0.25	-0.08
Ca	0.29	0.29	0.68	0.12	0.06	0.15	-0.31
Mg	0	0.14	0.88	0.05	0.09	0.13	-0.1
O3	-0.76	0.21	0.06	0.17	0	0.15	-0.16
NO2	0.77	0.48	0.07	0.11	0.11	0.07	-0.06
NO	0.9	0.18	0.12	0	-0.01	-0.03	-0.02
NOX	0.9	0.35	0.1	0.06	0.05	0.02	-0.04
SO2	0.03	0.52	-0.02	0.37	0.44	0	-0.12
CO	0.71	0.36	0.02	0.11	-0.07	0.23	-0.13
PM10	0.14	0.66	0.4	0.17	0.33	0.25	-0.2
PM25	0.25	0.69	-0.01	0.2	0.33	0.38	-0.17
PM25/PM10	0.11	0.15	-0.71	0.06	-0.16	0.4	0.09
Temp	-0.47	0.22	-0.12	0.12	-0.13	-0.55	0.42
WD	0.12	-0.06	0.15	-0.02	0.45	0.07	-0.02
WS	-0.23	-0.06	0.07	0.03	0.76	0.08	0.07
humi	-0.08	-0.04	-0.22	0.09	-0.03	-0.28	0.75
Pre	0.05	-0.13	-0.09	-0.11	0.04	0.16	0.75

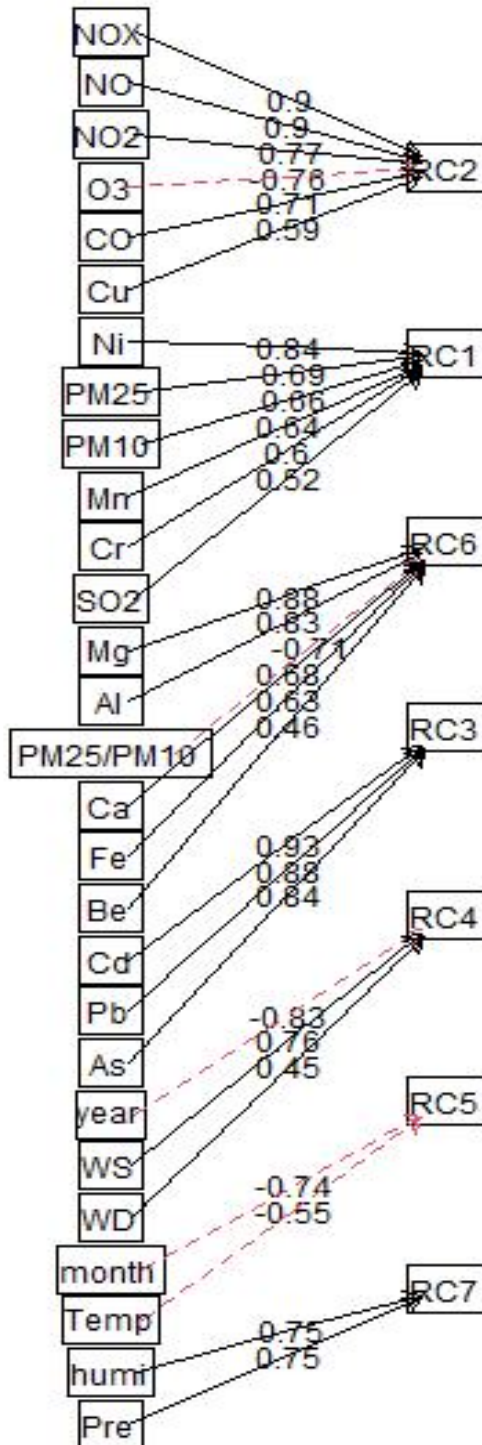


Fig 4-4. PCA diagram(Yeonsan-dong)

4.2.3. 주거지역

10년간 축적된(2014~2023) 대기중금속 측정망과 일반대기질 측정망의 26개(광안동 측정소는 SOx와

CO를 측정하지 않음) 변수를 선형변환하여 주성분 분석을 이용한 차원축소를 실시하였다. 추출할 주성분의 개수를 선정하기 위해 공업지역 측정망 데이터의 병렬 분석(Parallel analysis) 결과 스크리도표(Scree plots)에서 고유값이 1보다 큰 주성분 수를 확인한 결과 적절한 주성분 수는 6개로 나타났다.

주성분의 구조가 보다 명확하게 드러나도록 주성분의 직각 회전(Orthogonal rotation)을 실시하였으며 그 결과는 Fig 4-5 와 같다. 6개 주성분의 누적 분산 설명력은 69% 이므로 70% 정도의 분산 설명력을 충족하고 있다.

주성분 분석의 결과에 따라 각 주성분을 명명할 경우, RC2는 PM10과 지각유래금속(Fe, Al, Ca, Mg)으로 이루어져 있으며, 해변 인근 학교육상에 위치한 광안리 측정소의 특징을 고려해 보았을 때, 모래사장과 백사장의 영향에 의한 “자체발생원”으로 추정되고 전체 분산의 16%를 설명한다. RC1은 PM2.5와 Ni, Cr 등 지역 내 공업단지에서 발생하는 물질과 한 그룹을 형성함으로 “내부유입”에 의한 것으로 추정되며 전체 분산의 14%를 설명한다. RC6은 NOx, O3 발생과 관련된 것으로 “도로이동오염원”에 의한 것으로 추정되며 전체 분산의 13%를 설명한다. 그리고 RC3은 다른 측정소의 주성분과 동일하게 Cd, Pb, As가 한 그룹으로 형성되어 있어 외부유입의 영향으로 추정되며 전체 분산의 11%를 설명한다.

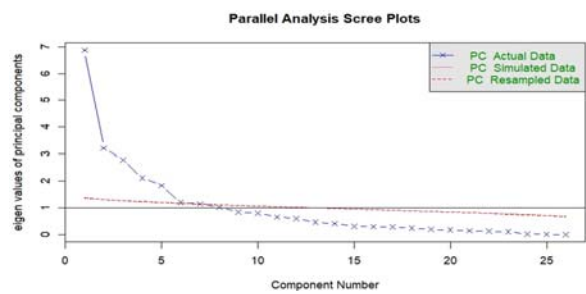


Fig 4-5. Parallel Analysis with Scree plots(PCA, Kwangan-dong)

Table 5-3. Principal Components Analysis(Kwangan-dong)

	RC2	RC1	RC6	RC3	RC5	RC4
year	0.10	-0.34	-0.09	-0.01	-0.01	0.74
month	-0.22	-0.10	0.06	0.07	0.34	0.22
Pb	0.01	0.15	0.08	0.90	-0.06	-0.08
Cd	-0.08	-0.04	-0.06	0.91	0.07	-0.04
Cr	0.21	0.42	0.18	0.02	-0.09	0.35
Cu	0.19	0.42	0.41	0.65	0.05	0.20
Mn	0.52	0.47	0.18	0.18	-0.13	0.21
Fe	0.78	0.44	0.16	0.12	-0.19	0.19
Ni	0.15	0.75	0.14	0.06	0.30	-0.01
As	0.05	0.04	-0.08	0.78	-0.02	0.04
Be	0.23	-0.07	0.01	-0.05	-0.01	-0.05
Al	0.84	0.21	-0.02	0.01	-0.19	0.10
Ca	0.82	0.27	0.14	0.05	-0.20	0.01
Mg	0.87	-0.01	-0.11	0.03	0.01	0.01
O3	0.15	0.19	-0.80	0.10	-0.08	0.06
NO2	0.15	0.52	0.76	0.08	-0.10	0.00
NO	0.06	0.19	0.88	0.03	-0.07	0.09
NOX	0.12	0.40	0.88	0.06	-0.09	0.04
PM10	0.65	0.60	0.12	0.16	-0.15	-0.11
PM25	0.22	0.82	0.16	0.17	-0.18	-0.25
PM25/PM10	-0.48	0.59	0.12	0.05	-0.18	-0.20
Temp	-0.11	0.09	-0.35	0.13	0.76	0.29
WD	-0.19	-0.05	0.01	0.03	-0.46	0.47
WS	-0.06	-0.13	-0.09	0.03	-0.20	-0.81
humi	-0.28	0.09	-0.11	0.06	0.80	-0.12
Pre	-0.05	-0.21	0.12	-0.17	0.49	-0.01

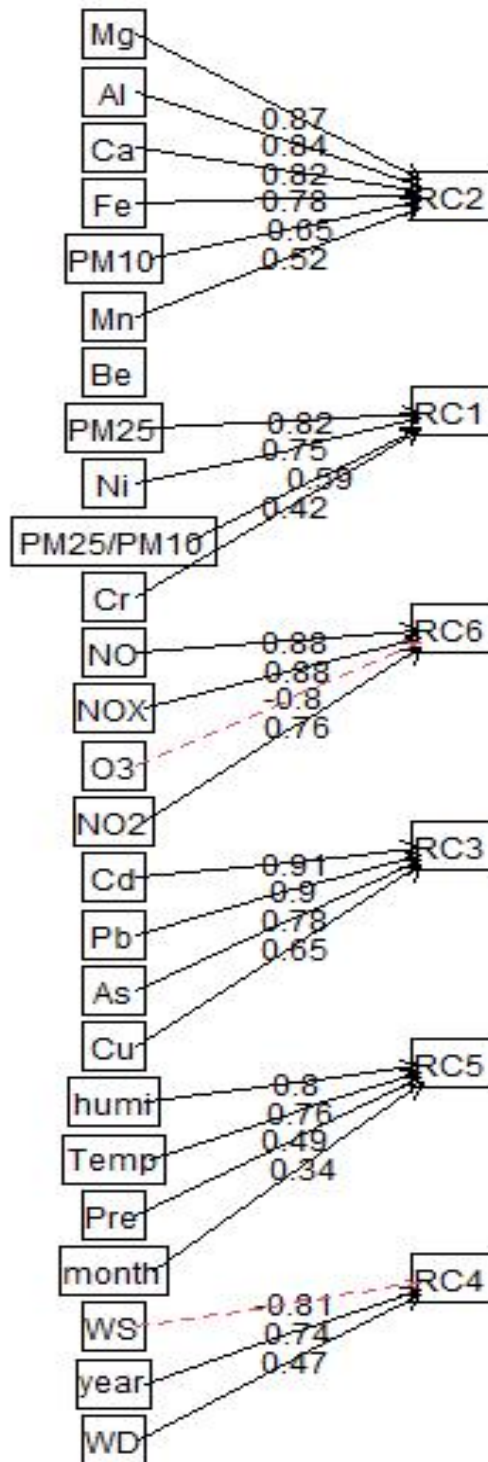


Fig 4-6. PCA diagram(Gwangsan-dong)

5. 결론

부산지역의 대기오염 변화를 장기적으로 분석하기 위해, 2002년부터 2023년까지 22년간 부산지역 대기

환경측정망에서 수집된 데이터를 활용하여 공업지역(학장동), 상업지역(연산동), 주거지역(광안동)의 연평균 및 계절별 PM10 농도의 경향성을 분석하였다. 이를 위해 Mann-Kendall 검정을 이용하여 대기오염물질 농도의 변화 추세를 검토하고, Sen's slope를 활용하여 연간 감소 또는 증가하는 정도를 산출하였다. 또한, Pettit 검정을 적용하여 PM10 농도의 변동점이 존재하는지를 확인하였다.

연구 결과, 공업지역(학장동)의 연평균 PM10 농도는 전반적으로 하락하는 경향을 보였으며, Sen's slope 값이 -2로 나타나 1년에 약 $2\mu\text{g}/\text{m}^3$ 씩 감소하는 것으로 분석되었다. Pettit 검정을 통해 분석한 결과, 변동점은 2013년으로 확인되었으며, 변동점 이전과 이후를 비교했을 때, 변동점 이후 PM10 농도의 하락 경향성이 더욱 두드러졌다. 계절별 분석에서는 모든 계절에서 PM10 농도가 감소하는 경향을 보였으며, Sen's slope 값은 봄 -2.067, 여름 -2.000, 가을 -2.222, 겨울 -1.433으로 계절별 차이를 나타냈다. 이를 통해 겨울철보다 봄·여름·가을철의 하락 경향성이 더 뚜렷한 것으로 확인되었다.

상업지역(연산동)의 연평균 PM10 농도 역시 하락하는 경향을 보였으며, Sen's slope 값이 -1.125로 나타나 연간 약 $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 씩 감소하는 것으로 분석되었다. Pettit 검정 결과, 변동점은 2017년으로 확인되었으며, 변동점 전후의 Sen's slope 값을 비교한 결과, 변동점 이전에는 -0.500이었으나 변동점 이후에는 -3.250으로 급격한 하락 경향을 나타냈다. 계절별 분석에서도 모든 계절에서 하락 경향이 확인되었으며, Sen's slope 값은 봄 -1.226, 여름 -1.444, 가을 -1.103, 겨울 -0.833으로 나타나, 여름철 PM10 농도의 감소폭이 가장 컸으며 겨울철이 가장 낮은 감소폭을 보였다. Pettit 검정 결과, 봄의 변동점은 2016년, 여름은 2009년, 가을과 겨울은 2017년으로 나타났으며, 변동점 이후 여름·가을·겨울철의 하락 경향성이 더욱 강해진 것으로 분석되었다. 특히, 겨울철의 하락 경향성 증가 폭이 가장 컸다.

주거지역(광안동)의 연평균 PM10 농도 역시 하락 경향을 보였으며, Sen's slope 값이 -0.923으로 나타나 연간 약 $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 씩 감소하는 것으로 분석되었다. Pettit 검정 결과, 변동점은 2009년으로 나타났으나, 변동점 전후의 Sen's slope 값은 통계적으로 유의미한 수준을 넘지 못했다. 계절별 분석에서는 겨울철을 제외한 나머지 계절에서 하락 경향이 확인되었으며,

Sen's slope 값은 봄 -1.070, 여름 -1.583, 가을 -0.956으로 분석되었다. 이를 통해 여름철 PM10 농도의 감소폭이 가장 크다는 점을 확인할 수 있었다. Pettit 검정 결과, 봄의 변동점은 2008년, 여름과 가을은 2009년으로 나타났으며, 가을철을 제외한 모든 계절에서 변동점 이후 PM10 농도의 변화가 유의미하지 않은 것으로 분석되었다.

또한, 2013년부터 2023년까지 최근 10년간 부산지역 공업지역(학장동), 상업지역(연산동), 주거지역(광안동)의 일반대기질 및 대기 중금속 농도를 분석하기 위해 주성분 분석(PCA)을 수행하였다. 분석 결과, 공업지역(학장동)에서는 대기 중 중금속 농도에 영향을 미치는 주요 요인으로 자체발생(21%), 도로이동오염원(15%), 정책영향(9%)이 확인되었다. 상업지역(연산동)의 경우 도로이동오염원(16%), 내부유입(15%), 외부유입(13%)이 주요 요인으로 분석되었으며, 주거지역(광안동)에서는 자체발생(16%), 내부유입(14%), 도로이동오염원(13%)이 주요 요인으로 나타났다.

이번 연구를 통해 부산지역 전반에서 PM10 농도가 장기적으로 감소하는 경향을 보였으며, 지역별·계절별 특성에 따라 감소폭과 경향성이 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 대기 중 중금속 농도의 경우 지역별 주요 발생 요인이 다르게 나타나, 이에 따른 맞춤형 대기오염 저감정책 수립이 필요함을 시사한다. 특히, 도로이동오염원과 내부유입 요인의 영향을 줄이기 위한 관리 대책이 필요하며, 산업지역에서는 자체 배출원의 관리를 강화하는 것이 중요할 것으로 보여진다.

참고문헌

1. Koo, T. W., Hong, M. S., Moon, S. H., Kim, H. J., "The PM2.5 Emission Source Contribution Analysis using The PMF Model in Urban Area.", *Journal of the Korean Applied Science and Technology*, 36(3), pp. 905-914, (2019).
2. Martinelli, N., Olivieri, O., Girelli, D., "Air Particulate Matter and Cardiovascular Disease: A Narrative Review.", *European Journal of Internal Medicine*, 24(4), pp. 295-302, (2013).
3. McGuinn, L. A., Ward-Caviness, C., Neas, L. M., Schneider, A., Di, Q., Chudnovsky, A., Schwartz, J., Koutrakis, P., Russell, A. G., Garcia, V., Kraus, W. E., Hauser, E. R., Cascio, W., Diaz-Sanchez, D., Devlin, R. B., "Fine Particulate Matter and Cardiovascular Disease: Comparison of Assessment Methods for Long-Term Exposure.", *Environmental Research*, 159, pp. 16-23, (2017).
4. National Institute of Environmental Research (NIER), "The monitoring study on exposure level and biomarker of environmental pollutants in the Pohang industrial complex", 5th annual report, Incheon, Republic of Korea., (2010).
5. Park, J. Y., "Risk assessment of heavy metals in PM10 using the spatial analysis of GIS in the Ulsan area", Thesis for Degree of Master, Hanyang university, Seoul, Republic of Korea, (1997).
6. International Agency for Research on Cancer (IARC), "Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths", Lyon, France, (2013).
7. Donaldson, K., MacNee, W., "Potential mechanisms of adverse pulmonary and cardiovascular effects of particulate air pollution (PM10)", *Int. J. Hyg. Environ.*, 203, 411-415, (2001).
8. Leili, M., Naddafi, K., Nabizadeh, R., Yunesian, M., Mesdaghinia, A., "The study of TSP and PM10 concentration and their heavy metal content in central area of Tehran, Iran, *Air Qual. Atmos. Hlth.*, 1, 159-166, (2008).
9. Kumar, D., Jugdutt, B.I., "Apoptosis and oxidants in the heart", *J. Lab. Clin. Med.*, 142, 288-297, (2003).
10. Vijayanand, C., Rajaguru, P., Kalaiselvi, K., Selvam, K.P., Palanivel, M., "Assessment of heavy metal contents in the ambient air of the Coimbatore city", *Tamilnadu, India, J. Hazard Mater.*, 160, 548-553, (2008).
11. Do, W. G. and Jung, W. S., "Estimation of PM10 Source Locations in Busan using PSCF model.", *Journal of Environmental Science International*, 24(6), pp. 793-806,

- (2015).
12. Kim J. H., Kim K. S. S. "Long-Term trend analysis by month for meteorological stations using a gridded data of numerical model with temperatures and precipitations." journal of the Korean Data and Information Science Society, 28, 1133-1144, (2017).