



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

이 학 석 사 학 위 논 문

LSTM을 이용한 부산의 PM10 중  
대기중금속의 농도 분석과 예측



2023년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

환 경 대 기 과 학 전 공

박 소 정

이 학 석 사 학 위 논 문

LSTM을 이용한 부산의 PM10 중  
대기중금속 농도 분석과 예측

지도교수 이 동 인

이 논문을 이학석사 학위논문으로 제출함.

2023년 2 월

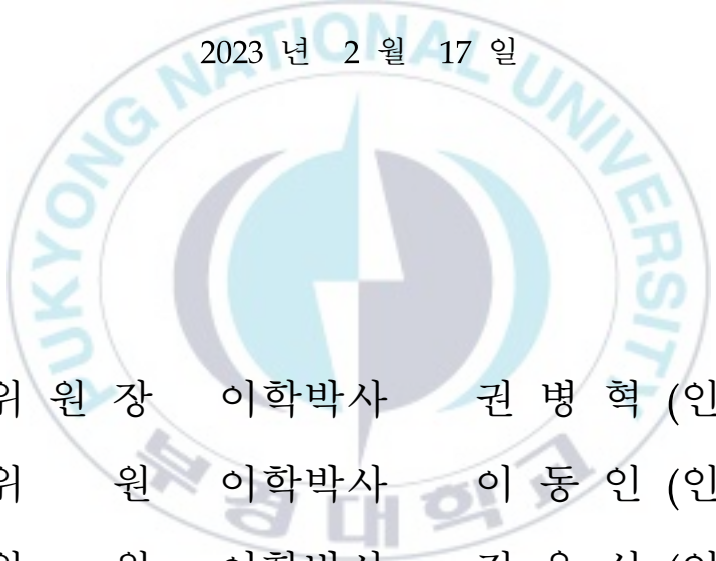
부 경 대 학 교 대 학 원

환 경 대 기 과 학 전 공

박 소 정

박소정의 이학석사 학위논문을 인준함.

2023년 2월 17일



위 원 장 이학박사 권 병 혁 (인)  
위 원 이학박사 이 동 인 (인)  
위 원 이학박사 정 우 식 (인)

# 목 차

|                 |     |
|-----------------|-----|
| List of Tables  | ii  |
| List of Figures | iii |
| Abstract        | v   |
| 1. 서론           | 1   |
| 2. 재료 및 방법      | 3   |
| 2.1 연구기간 및 대상   | 3   |
| 2.2 분석 방법       | 5   |
| 2.3 ETS / LSTM  | 5   |
| 3. 결과           | 8   |
| 3.1 연도별 농도 변화   | 8   |
| 3.2 계절별 농도 변화   | 14  |
| 3.3 지역별 농도 변화   | 19  |
| 3.3.1 상관분석      | 20  |
| 3.3.2 주거지역      | 23  |
| 3.3.3 상업지역      | 25  |
| 3.3.4 공업지역      | 26  |
| 3.4 ETS / LSTM  | 29  |
| 4. 결론           | 33  |
| 참고문헌            | 36  |
| 부록              | 42  |

## List of Tables

|   |    |
|---|----|
| Table 1. Site information. ....   | 4  |
| Table 2. General notation Exponential Smoothing. ....   | 6  |
| Table 3. Annual mean concentrations of PM10 and heavy metals<br>from 2014 to 2020. ....   | 9  |
| Table 4. Trend estimates created by TheilSen function for PM10<br>and heavy metals by measuring site. ....  | 19 |
| Table 5. Number of Establishments & Workers, by Industry of<br>Gamjeon-dong and Hakjang-dong sites from 2014 to 2020.<br>(Collection of 'Sasang-gu Statistical Yearbook' published from<br>2015 to 2021) .... | 28 |
| Table 6. Annual averaged and normalized data for PM10 and heavy<br>metals. ....   | 30 |
| Table 7. Comparison of performance indicators RMSE, MAE, and<br>MAPE by measurement site (Inf : Estimate > 0). ....   | 32 |

## List of Figures

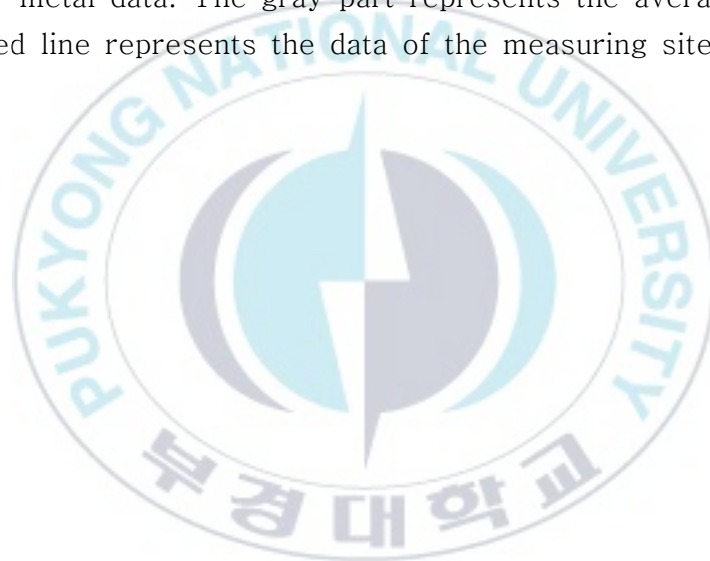
|   |    |
|---|----|
| Fig 1. Locations of the measuring sites (Site B (Bugok-dong, residential site); Site D (Deokchen-dong, residential site); Site H (Hakjang-dong, industrial site); Site G (Gwangan-dong, residential site), site Y (Yeonsan-dong, commercial site. (source: National Geographic Information Institute) .....   | 4  |
| Fig. 2. Structure of the RNN and LSTM. ....   | 7  |
| Fig. 3. Monthly mean concentrations of PM10 and heavy metals in monitoring sites (left panel) and a long-time annual trend plot of concentration normalized to the annual mean value in 2014 (right panel). ....  | 10 |
| Fig. 4. Seasonal trend of PM10 and heavy metals. Monthly average concentration in boxplot(left panel) and ggplot graph(right panel) from 2014 to 2020. Red is Yeonsan-dong site in the commercial area, green is the Hakjang-dong site in the industrial area, blue is the Deokcheon-dong site in the residential area, and purple is the Gwangan-dong site in the residential area. .... | 15 |
| Fig. 5. Trend estimates created by TheilSen function for PM10 and heavy metals by measuring site. ....  | 19 |
| Fig. 6. Visualization of the correlation between PM10 and heavy metals for each measuring station using R's corrplot package. The darker the color, the stronger the correlation. ....  | 21 |
| Fig. 7. The number of visitors from 2018 to 2020 in Buk-gu and Suyeong-gu provided by the 'Korea Tourism Data Lab' . It is based on outside visitors (domestic visitors + foreign visitors) as mobile communication data. ....  | 23 |

Fig. 8. Comparison of traffic between Gwangan-dong and Deckcheon-dong (2014~2020). .....24

Fig. 9. As concentrations( $\text{ng}/\text{m}^3$ ) at the commercial site. (a) Polar plot, (b) Pollution rose as frequency of counts according to wind direction (%) near Yeonsan-dong. ....26

Fig. 10. Number of Establishments & Workers, by Industry (Gamjeon-dong and Hakjang-dong). .....27

Fig. 11. Radar graph normalized with annual average values of PM10 and heavy metal data. The gray part represents the average data, and the red line represents the data of the measuring site. ....30





Concentration analysis and prediction of heavy metals in PM10 by  
LSTM, Busan City

So Jeong Park

Major of Environmental Atmospheric Sciences,  
The Graduate School,  
Pukyong National University

**Abstract**

This study is analyzed the temporal concentration change trend using the atmospheric heavy metals (Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, As, and Mn) and PM10 data provided by the Busan Metropolitan City Institute of Health and Environment, for 7-year period (2014–2020) in four different sites(residential area; Gwangan-dong and Deokcheon-dong, commercial area; Yeonsan-dong, and industrial area; Hakjang-dong) of Busan. In addition, using data from 2014 to 2020, the 2021 trend was predicted with Exponential smoothing Methods(ETS) and Long Short-Term Memory(LSTM) and the accuracy was analyzed.

From 2014 to 2020, PM10 and heavy metals concentration tended to decrease, but their extent was different. By region, the Gwangan-dong site showed the least decrease and the trend of the highest increase in Cu was confirmed through traffic analysis. Deokcheon-dong site showed a decreasing trend in all items except for Cd and Cr, which increased slightly. The Hakjang-dong site of industrial area showed a decreasing trend in all items, and it was consistent with the decrease in the number of businesses and employees, showing the highest decrease. At the Yeonsan-dong site in the commercial area, Cr, Cu, and As showed an

increasing trend and among them, As showed the highest increase. For prediction using ETS and LSTM, heavy metals that can characterize regions were selected from annual average data and determined as Cu in Gwangan-dong, Pb in Deokcheon-dong, As in Yeonsan-dong, and Ni in Hakjang-dong. As the selected heavy metals, ETS(A,A,A), ETS(M,Ad,M), ETS(A,Ad,A), ETS(M,A,M) were determined, respectively, and LSTM showed better performance than ETS.



## 1. 서론

산업화와 교통량 증가 등 인위적인 발생원에서 생성된 미세먼지에 함유되어 있는 중금속들은 인체에 흡수될 시 만성중독위험이 있으며, 각종 질환을 야기하고 일부에는 발암성이 있는 것으로 알려져 있다(강병욱 등, 2018; 최성화 등, 2021).

또한, 미세먼지와 중금속은 국내의 산업 활동, 교통량 변화, 기상변화 등으로 내부 오염원뿐만 아니라 국내의 대기질에 외부로부터의 오염원(중국 내륙 공업지역과 고비 사막 지역 등)이 크게 영향을 미친다고 보고된 바 있다(Lee et al., 2011).

미세먼지는 중금속을 흡착할 수 있는 강한 가능성을 가지고 있으며(Li et al., 2013) 봄철 중국에서 불어오는 황사보다 산업단지 및 화석연료 사용에 의해 더 많은 영향을 받는다고 알려져 있다(김종수 등, 2014).

1980년대부터 급속한 산업화로 인해 세계에서 가장 많은 대기오염물질을 배출하는 중국은 시공간적으로 다양한 데이터 자료를 활용하여 Duan and Tan (2013)는 Cr, As, Cd의 심각한 오염 수준을 밝혔으며, Liu et al. (2021)와 Wu et al. (2020)는 수도 베이징의 중금속 분포를 파악하고, 지역별 특성을 살려 공업지역(Dai et al., 2015; Tan et al., 2014)과 고속도로 및 도로먼지의 중금속 분석(Shao et al., 2013)을 실시하고, PM10, PM2.5, 더 나아가 PM1.0 중 중금속 농도에 관한 연구(Li et al., 2020)를 시행하는 등 다양한 대기오염 저감 전략을 제안하였다.

국내에서는 각 도시별 산업단지를 중심으로 중금속 농도 분석한 결과, 산업단지 및 공단지역은 주거지역에 비해 분명한 고농도의 중금속들이 나타나며 이는 지역별로, 산업단지의 주력 산업 종류별로 다르게 나타나 지역 특성에 맞는 저감 정책의 필요성을 논하였다(강병욱 등, 2018; 김종수 등, 2014; 정기호 등, 2006).

도심에서의 미세먼지와 대기중금속의 경우 교통밀집지역, 인구밀집지역, 공사장에서 고농도를 보이는 뚜렷한 공간적 농도분포를 보이는 경향이 있었다(박은정 등, 2005; 정종철, 2014; 최배진과 김기현, 2003).

부산은 2022년 기준 인구 약 338만 명 이상의 대도시로 해안과 산지가 공존하며 도시 녹지, 하천 환경, 약 20개의 크고 작은 공단지역, 경작지

등 구조적 다양성이 높다(박선엽, 2021). 동시에 국내에서 가장 큰 규모의 항만과 22개의 산업단지, 공항이 있는 부산시는 광범위하고 장기적인 대기오염 관리가 필요하다.

부산의 항만지역은 도심의 상업지역 및 주거지역에 비해 미세먼지와 중금속이 유사하거나 고농도를 보였으며, 도시 도로변의 미세먼지는 대조지역(주거지역)보다 약 18% 증가율을 보였다(이승원 등, 2011; 전병일, 2018; 정은혜 등, 2021). 부산 사상공단을 중심으로 대기중금속을 분석한 최성화 등 (2021)에서 PM10과 PM2.5 평균 농도가 주거지역에 비해 1.2 배 높고, 유해중금속은 1.3~6.5배 높은 수준이며 봄과 겨울에 유해중금속 농도가 뚜렷하게 증가하였다.

PM10과 대기중금속의 농도 경향 분석은 국내외에서 활발하게 진행되고 있지만 기계학습을 통한 장기적인 시계열 데이터 분석은 매우 부족한 실정이다. 예를 들어, 중국에서는 Li et al. (2020)과 Xiao et al. (2022)이 SVM, ANN, BP-ANN을 사용하여 중금속을 예측하였고 Liu et al. (2021)과 Wang et al., (2021)은 LSTM을 이용하여 중금속을 예측하였지만 각각 강 유역의 토양 중금속, 농작물에 함유된 중금속 Cd에 한정되었다. 국내에서는 권혜지와 김용구 (2016)가 일반선형모형 접근법을 이용하여 망간 농도를 모델링하였고 다중선형회귀 분석, 각종 인공신경망(LSTM, DAE, DNN 등)을 활용한 예측이 미세먼지로 한정되거나 타지역에서 진행되었다(서양모, 2019; 오중민 등, 2017; 이한솔, 2016; 조경학 등, 2019).

따라서 본 연구에서는 2014년부터 2020년까지의 PM10과 대기중금속 7종(Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, As, Mn)의 시공간적 변동성을 분석하고 각 지역을 대표할 수 있는 중금속을 선정하여 ETS 함수와 LSTM 모델링으로 7년간의 데이터로 만들어진 2021년 예측자료와 실측값을 비교하여 예측 정확도를 분석하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 연구기간 및 대상

2014년부터 2020년까지 총 7년간 부산광역시 보건환경연구원에서 운영하는 대기환경종합측정소 특수대기오염측정망의 자료(<http://heis.busan.go.kr/>)를 수집하였다. 대기환경종합측정소에서 관리하는 대기중금속은 총 12종으로 Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, As, Mn, Fe, Al, Ca, Mg, Be이며 이 중 대기환경보건법 시행규칙의 규제대상 대기오염물질인 먼지(PM10), Pb, Cd, Cr, Cu, Ni와 선행연구를 참고하여 As, Mn을 추가하여 총 8종을 분석하였다. 2021년의 대기중금속 자료는 공공데이터 포털의 openAPI '부산 대기 중금속 정보'에서 수집하였다. 본 자료에서 아시아 대륙의 몽골과 중국의 사막 지역에서 운송되어 봄에 더 많은 빈도로 발생하는 황사는 제외하고 데이터를 수집하였다.

부산광역시 대기중금속 측정 지점은 2020년 기준 광안동, 부곡동, 연산동, 학장동, 덕천동 다섯 군데에 위치해 있으며 주거지역(광안동, 덕천동, 부곡동), 상업지역(연산동), 공업지역(학장동)으로 분류되어 있다. 연산동 측정소는 2018년까지 주거지역으로 등록된 연제초등학교에서 부산시청 앞 공원으로 자리를 옮겨 상업지역으로 교체등록 되었으며, 초등학교와 시청은 직선상 500m 거리에 있다. 학장동 측정소가 위치한 사상공업단지는 부산광역시 사상구 주례동, 감전동, 학장동 일원의 약 3,021,000m<sup>2</sup>에 해당하며, 2020년 기준 총 1,773개의 공장 중 683개만이 등록되어 있다(이동현 등, 2020; 이만형 등, 2021). 부곡동의 경우 2018년 상업지역이 삭제되고 신규 지정된 곳으로 데이터의 연속성이 사라졌다고 판단되어 총 4개 측정소의 자료를 사용하였으며 표(Table 1)와 그림(Fig. 1)에 정리되었다.

Table 1. Site information.

| Measuring site | Site environment | Longitude (E° ) | Latitude (N° ) |
|----------------|------------------|-----------------|----------------|
| Gwangan-dong   | Residential      | 35.1571         | 129.1176       |
| Deokcheon-dong | Residential      | 35.2158         | 129.0201       |
| Yeonsan-dong   | Commercial       | 35.1811         | 129.0746       |
| Hakjang-dong   | Industrial       | 35.1462         | 128.9837       |



Fig. 1. Locations of the measuring sites (Site B (Bugok-dong, residential site); Site D (Deokchen-dong, residential site); Site H (Hakjang-dong, industrial site); Site G (Gwangan-dong, residential site), site Y (Yeonsan-dong, commercial site).  
(source: National Geographic Information Institute)

## 2.2 분석 방법

모든 분석은 소프트웨어 R(ver. 3.6.3)로 작성되었으며 시계열 분석에 open air, corrplot package가, 예측에는 R의 tensor flow, keras, forecast package가 사용되었다.

2014년부터 2020년까지 7년간 PM10과 대기중금속은 매월 둘째 주 월요일부터 5일간 시료를 채취하여 측정소당 420개의 일별 데이터를 평균하여 월별 자료로 사용하였다.

open air package에서 smoothTrend, theilSen, polar plot, pollution rose 함수를 사용하였다. 전체 추세를 평가하기 위해 LOESS를 사용하여 비계절화된 월간 평균값을 얻었으며, NA 데이터는 Kalman 필터와 Kalman Smooth를 사용하여 대체하였다(Carslaw and Ropkins, 2012).

## 2.3. ETS / LSTM

### 2.3.1 ETS

지수평활화(Exponential Smoothing Methods, ETS)는 일변량 데이터에 대한 시계열 예측 방법으로, 단순지수평활은 추세와 계절성 패턴이 없는 데이터 예측에 사용한다. 홀트의 선형 추세 기법은 추세가 있는 데이터를 예측하기 위해 단순지수 평활법을 확장한 것으로 예측식과 함께 level과 trend를 포함한다. 홀트-윈터스 계절성 기법은 추세와 계절성을 모두 예측하는 방법으로 예측식과 3개의 평활식(level, trend, seasonal)을 포함하며 여기에 오차가 포함되면 상태공간모델이 완성되며 구성은 표(Table 2)에 정리되었다.

Table 2. General notation Exponential Smoothing.

| Trend Component      | Seasonal Component |                 |                       |
|----------------------|--------------------|-----------------|-----------------------|
|                      | N<br>(None)        | A<br>(Additive) | M<br>(Multiplicative) |
| N (None)             | N, N               | N, A            | N, M                  |
| A (Additive)         | A, N               | A, A            | A, M                  |
| Ad (Additive damped) | Ad, N              | Ad, N           | Ad, M                 |

(source: Hyndman and Athanasopoulos (2018))

가장 간단한 단순회귀분석부터, 다중회귀분석, 딥러닝에 이르기까지 여러 가지 모델링 방법이 있지만, 상태공간모델 ETS가 시계열 데이터에 적용이 쉽고 좋은 결과를 보여주는 것으로 알려져 있다.

### 2.3.2 LSTM

LSTM(Long Short-Term Memory)는 장기 종속성을 학습할 수 있는 특수한 종류의 RNN(Recurrent Neural Networks; 순환신경망)으로, 과거 정보를 지속적으로 기억하여 예측값을 찾는 RNN은 시간이 길어질수록 모델 학습이 너무 느려지거나 완전히 중지되는 그라디언트 소실 (vanishing gradient)이라는 문제가 생긴다(Chen et al., 2017; Yadav et al., 2020). 이 RNN의 단점을 극복하기 위해 LSTM이 만들어졌으며 그 구조는 Fig. 2와 같다.



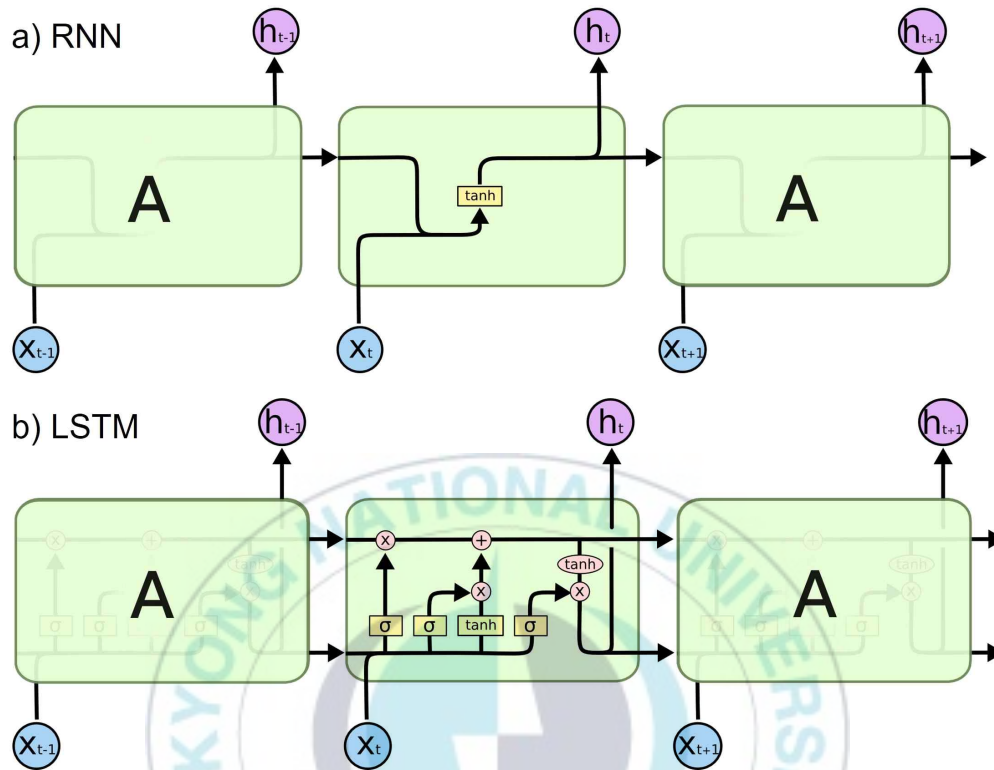


Fig. 2. Structure of the RNN and LSTM.

(source: “Understanding LSTM Networks” , github)

RNN은 신경망의 반복 모듈 체인 형태로 반복 모듈은 단일  $\tanh$  레이어와 같은 매우 간단한 단일 계층 구조를 가진다. RNN과 같은 사슬형 구조이지만 LSTM은 반복 모듈의 경우 3개 또는 4개의 상호작용하는 레이어가 있다. 그림에서 각 게이트는 선택적으로 정보를 통과시키며 입력 (input), 은닉 (forget), 출력 (output) 게이트는 시그모이드 함수로 구성된다. 입력 게이트는 새 값이 메모리로 흐르는 정도를 제어하며, 은닉 게이트는 값이 메모리에 남아 있는 정도를 제어하며, 출력 게이트는 메모리의 값이 블록의 활성 출력을 계산하는 데 사용되는 범위를 제어하면서 과거 정보를 효율적으로 제어할 수 있게 된다(김영희와 장관중, 2021; Ki-Hong Shin, 2021).

### 3. 결과

#### 3.1 연도별 농도 변화

PM10과 대기중금속의 농도 변화 추세를 보기 위해 R의 open air package의 smoothTrend 함수를 사용하였다. 월별 평균 농도는 일별 농도를 평균하여 결정되었으며, 월별 변동에 대한 계절적 영향의 분해로 전체 추세 평가를 위해 LOESS를 사용하여 비계절화된 월간 평균값을 나타내었다. Fig. 3의 왼쪽이 월간 평균값으로 작성된 연도별 농도 변화 그래프이며, 오른쪽은 장기적인 농도 변동 경향을 알아보기 위해 월평균 농도를 연간 값으로 Z-점수 정규화한 것이다. 2014년부터 2020년까지 PM10과 대기중금속 연평균 농도를 지역별로 Table 3에 나타내었다. 연산동의 경우 측정소의 위치가 바뀌었지만 표(Table 3)에서 2018년을 기준으로 연 평균값의 차이가 뚜렷하게 나타나지 않았다.

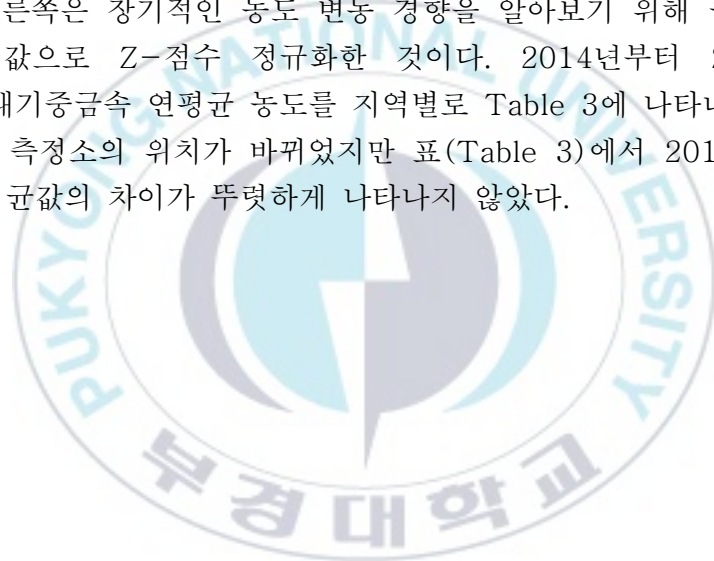


Table 3. Annual mean concentrations of PM10 and heavy metals from 2014 to 2020.

| Residential_G     |      |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| µg/m <sup>3</sup> | PM10 | Pb    | Cd    | Cr    | Cu    | Ni    | As    | Mn    |
| 2014              | 32.3 | 0.018 | 0.000 | 0.001 | 0.008 | 0.014 | 0.002 | 0.003 |
| 2015              | 33.3 | 0.018 | 0.001 | 0.001 | 0.008 | 0.012 | 0.002 | 0.004 |
| 2016              | 45.6 | 0.016 | 0.001 | 0.001 | 0.011 | 0.019 | 0.003 | 0.005 |
| 2017              | 39.8 | 0.011 | 0.000 | 0.001 | 0.009 | 0.018 | 0.002 | 0.003 |
| 2018              | 39.4 | 0.015 | 0.001 | 0.002 | 0.009 | 0.013 | 0.002 | 0.004 |
| 2019              | 36.3 | 0.018 | 0.001 | 0.002 | 0.011 | 0.019 | 0.002 | 0.005 |
| 2020              | 34.2 | 0.014 | 0.000 | 0.002 | 0.011 | 0.014 | 0.001 | 0.003 |
| Residential_D     |      |       |       |       |       |       |       |       |
| µg/m <sup>3</sup> | PM10 | Pb    | Cd    | Cr    | Cu    | Ni    | As    | Mn    |
| 2014              | 48.5 | 0.018 | 0.000 | 0.001 | 0.011 | 0.019 | 0.002 | 0.003 |
| 2015              | 44.1 | 0.014 | 0.000 | 0.001 | 0.010 | 0.017 | 0.002 | 0.003 |
| 2016              | 42.4 | 0.016 | 0.001 | 0.002 | 0.013 | 0.023 | 0.003 | 0.006 |
| 2017              | 33.5 | 0.011 | 0.000 | 0.002 | 0.010 | 0.020 | 0.002 | 0.004 |
| 2018              | 34.5 | 0.011 | 0.001 | 0.002 | 0.009 | 0.014 | 0.002 | 0.004 |
| 2019              | 36.3 | 0.014 | 0.001 | 0.002 | 0.011 | 0.018 | 0.002 | 0.005 |
| 2020              | 34.2 | 0.012 | 0.001 | 0.002 | 0.010 | 0.015 | 0.001 | 0.002 |
| Commercial        |      |       |       |       |       |       |       |       |
| µg/m <sup>3</sup> | PM10 | Pb    | Cd    | Cr    | Cu    | Ni    | As    | Mn    |
| 2014              | 40.8 | 0.020 | 0.000 | 0.002 | 0.013 | 0.021 | 0.002 | 0.003 |
| 2015              | 44.0 | 0.020 | 0.001 | 0.002 | 0.014 | 0.020 | 0.002 | 0.004 |
| 2016              | 47.5 | 0.018 | 0.001 | 0.002 | 0.016 | 0.022 | 0.003 | 0.005 |
| 2017              | 46.5 | 0.012 | 0.000 | 0.002 | 0.012 | 0.021 | 0.003 | 0.004 |
| 2018              | 34.6 | 0.015 | 0.001 | 0.002 | 0.013 | 0.017 | 0.002 | 0.005 |
| 2019              | 35.8 | 0.018 | 0.001 | 0.003 | 0.014 | 0.024 | 0.003 | 0.007 |
| 2020              | 33.5 | 0.014 | 0.001 | 0.002 | 0.015 | 0.020 | 0.002 | 0.003 |
| Industrial        |      |       |       |       |       |       |       |       |
| µg/m <sup>3</sup> | PM10 | Pb    | Cd    | Cr    | Cu    | Ni    | As    | Mn    |
| 2014              | 55.4 | 0.039 | 0.000 | 0.020 | 0.046 | 0.091 | 0.016 | 0.003 |
| 2015              | 49.9 | 0.042 | 0.000 | 0.024 | 0.042 | 0.095 | 0.021 | 0.005 |
| 2016              | 52.4 | 0.032 | 0.001 | 0.018 | 0.039 | 0.094 | 0.017 | 0.006 |
| 2017              | 51.6 | 0.021 | 0.001 | 0.017 | 0.035 | 0.090 | 0.017 | 0.005 |
| 2018              | 44.4 | 0.021 | 0.001 | 0.013 | 0.023 | 0.055 | 0.010 | 0.004 |
| 2019              | 45.6 | 0.023 | 0.001 | 0.017 | 0.035 | 0.075 | 0.013 | 0.006 |
| 2020              | 41.5 | 0.021 | 0.001 | 0.015 | 0.030 | 0.076 | 0.013 | 0.003 |

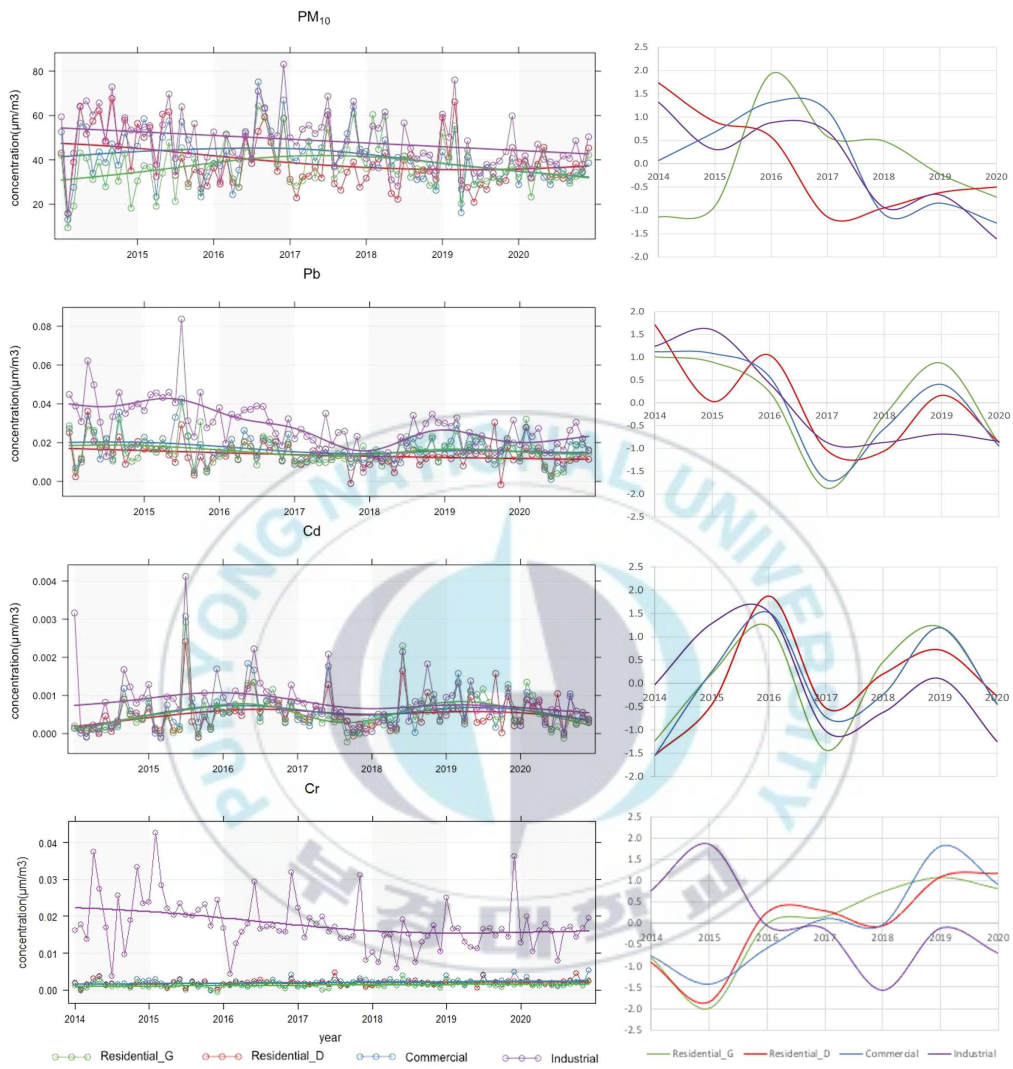


Fig. 3. Monthly mean concentrations of PM<sub>10</sub> and heavy metals in monitoring sites (left panel) and a long-time annual trend plot of concentration normalized to the annual mean value in 2014 (right panel).

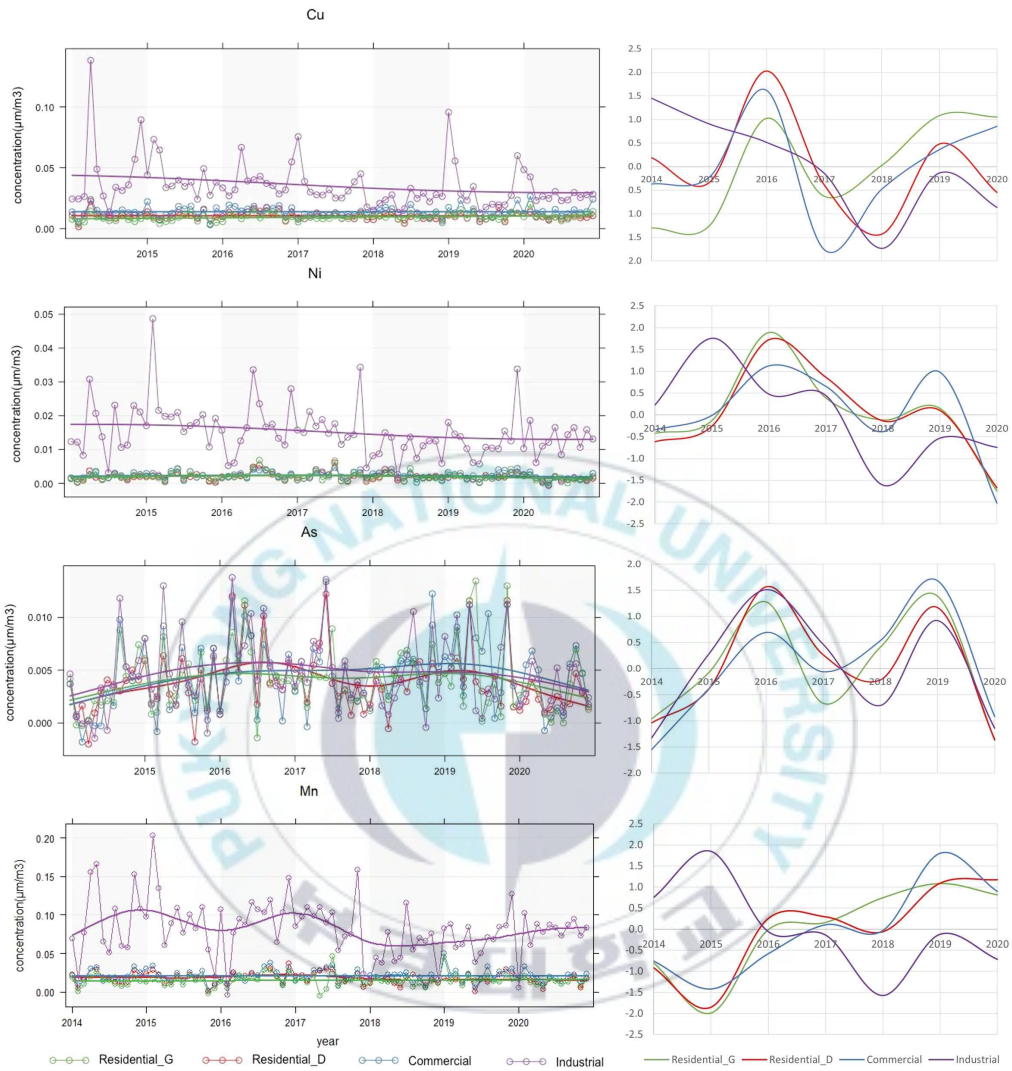


Fig. 3. Continued.

PM10과 대기중금속은 2016년과 2019년에 고농도 추세가 보이는 양상이 있지만 2014년부터 감소추세임이 확인되었다.

PM10의 경우 지역별 차이는 있으나 2013년 이후 국가적 미세먼지 저감 정책 등이 효과로 인해 감소추세를 보이며 이는 선행연구들과 일치하는 경향을 보였다.

Pb는 모든 측정소에서 2016년까지 꾸준히 감소하는 추세를 보이다가 주거지역과 상업지역은 반동하며 증가추세로 전환되었지만, 2020년부터 감소하기 시작했고 공업지역인 학장동 측정소는 2017년 이후 뚜렷한 경향 없이 유지되는 모습을 보였다. Pb는 금속공정 공장, 도로 마모, 자동차의 타이어, 배기관, 브레이크의 마모, 겨울철 난방 연료의 사용량 등이 주요한 발생 원인으로 알려져 있다(나덕재와 이병규, 2000; 이평구 등, 2006; 최윤나 등, 2007).

Cd 역시 Pb와 같이 증감을 반복하다 2020년부터 모든 측정소가 감소추세를 보였다. 이는 Cd의 주 오염원이 화석연료의 연소에 의한 배기구 배출, 난방연료의 사용, 자동차 타이어, 차체의 부식 등(나덕재와 이병규, 2000; 송금주 등, 2020) Pb와 유사하기 때문으로 보인다.

Cr의 경우 학장동 측정소에서 가장 고농도를 보이는 지배적인 중금속이나 2014년 이후에는 감소하는 학장동 측정소를 제외하고 상업지역과 주거지역에서 상승하는 추세가 나타났다. Cr의 주 배출원은 크롬도금 업장이 많은 곳, 스테인리스 스틸을 절삭, 가공 등 산업활동과 관련되어 있으며 자동차의 부품에서 많이 사용된 크롬도금 제품들로 인해 배출될 가능성이 있다.

Cu 역시 Cr과 마찬가지로 공업지역과 주거, 상업지역의 추세가 반대로 나타났다. 학장동 측정소는 7년 동안 계속해서 감소하는 추세를 보이나 주거지역이면서 관광지인 광안동 측정소와 상업지역 연산동 측정소가 2019년 이후 증가추세로 전환되었다. Cu는 가공이 쉬워 공단지역에서 다용도로 널리 이용되어 고농도를 보이며 자동차 브레이크 패드 마모 등으로 인해 발생할 수 있으므로(정혜령 등, 2020) 주거 및 상업지역에서 교통량 변화로 인한 Cu 증가 가능성이 있다.

Ni은 Cr, Cu와 함께 학장동 측정소에서 지배적인 배출원 중 하나이며 2019년까지는 Cr, Cu와 비슷한 추세를 보였다. Ni의 경우 공단지역에서

대부분 배출되기 때문에 금속 및 도금 관련 업체가 40.9%를 차지(2020년 기준)하는 학장동 측정소가 위치한 사상공업단지를 대표할 수 있는 중금속으로 판단된다.

As는 산업시설과 연소, 자동차, 살충제 제조, 목재 운반 및 가공업 등 복합적인 영향을 받는다(최성화 등, 2021). 농도 분석에서 지역 간 농도차가 거의 없이 뚜렷한 쌍봉 그래프가 관찰되었다. 이는 선행연구 논문과 일치하는 결과이며 지역 차이 없이 배출원이 동일하다는 것을 추측해볼 수 있다.

Mn은 일반적으로 지각, 석탄연소시설, 소각 등에서 배출되는 것으로 알려져 있으며 포항산업단지와 같은 철강이나 철합금 산업이 활발한 곳에서도 고농도를 보이는 경향이 있다(강병욱 등, 2018). Mn은 다른 중금속과 같이 2018년부터 상승하는 추세가 나타났는데 학장동 측정소는 그 증가폭이 주거지역 및 상업지역보다 낮으며 소폭 증가 후 변동 없이 유지한다.

2019년에 비해 2020년 중금속이 지역별 차이 없이 큰 폭으로 감소하는 뚜렷한 경향을 보이는데 이는 2020년 3월부터 한국에 본격적으로 영향을 미치기 시작한 코로나 19의 영향으로 국내 산업시설, 기상 상태, 교통량 변화 등과 국외 특히 중국의 스모그 및 황사, 공장 가동 등 산업시설이 위축된 영향(박선엽, 2020; 심혜민과 김은정, 2021)으로 판단된다.

### 3.2 계절별 농도 변화

대기중금속 별 계절적 농도 변화와 추세를 알아보기 위해 산술평균으로 최소, 최대값을 구하고 소수점 셋째 자리에서 반올림하여 boxplot으로 나타내었다. NA값은 평균값으로 대체하였다. Fig. 4에서 왼쪽이 월별 농도 추이를 나타낸 것이고 오른쪽은 boxplot의 월별 추세를 geom\_smooth 함수를 사용하여 표현한 것이다.





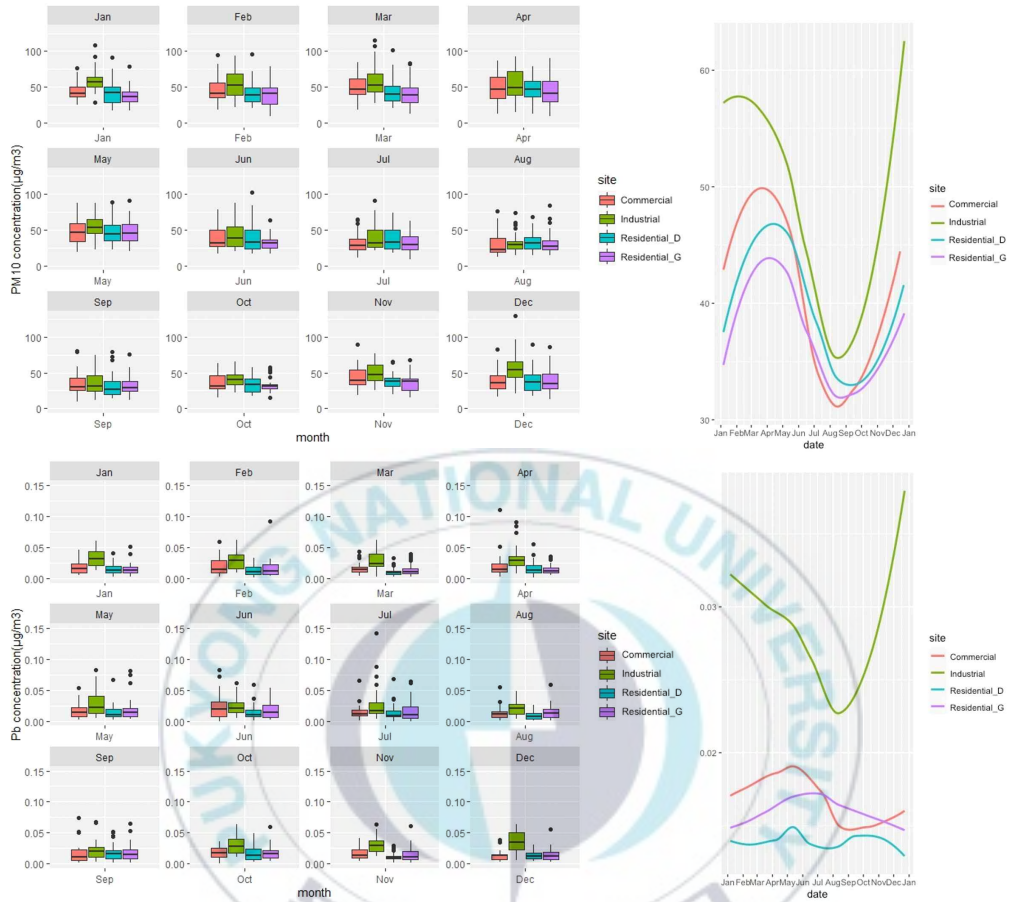


Fig. 4. Seasonal trend of PM10 and heavy metals. Monthly average concentration in boxplot(left panel) and ggplot graph(right panel) from 2014 to 2020. Red is Yeonsan–dong site in the commercial area, green is the Hakjang–dong site in the industrial area, blue is the Deokcheon–dong site in the residential area, and purple is the Gwangan–dong site in the residential area.

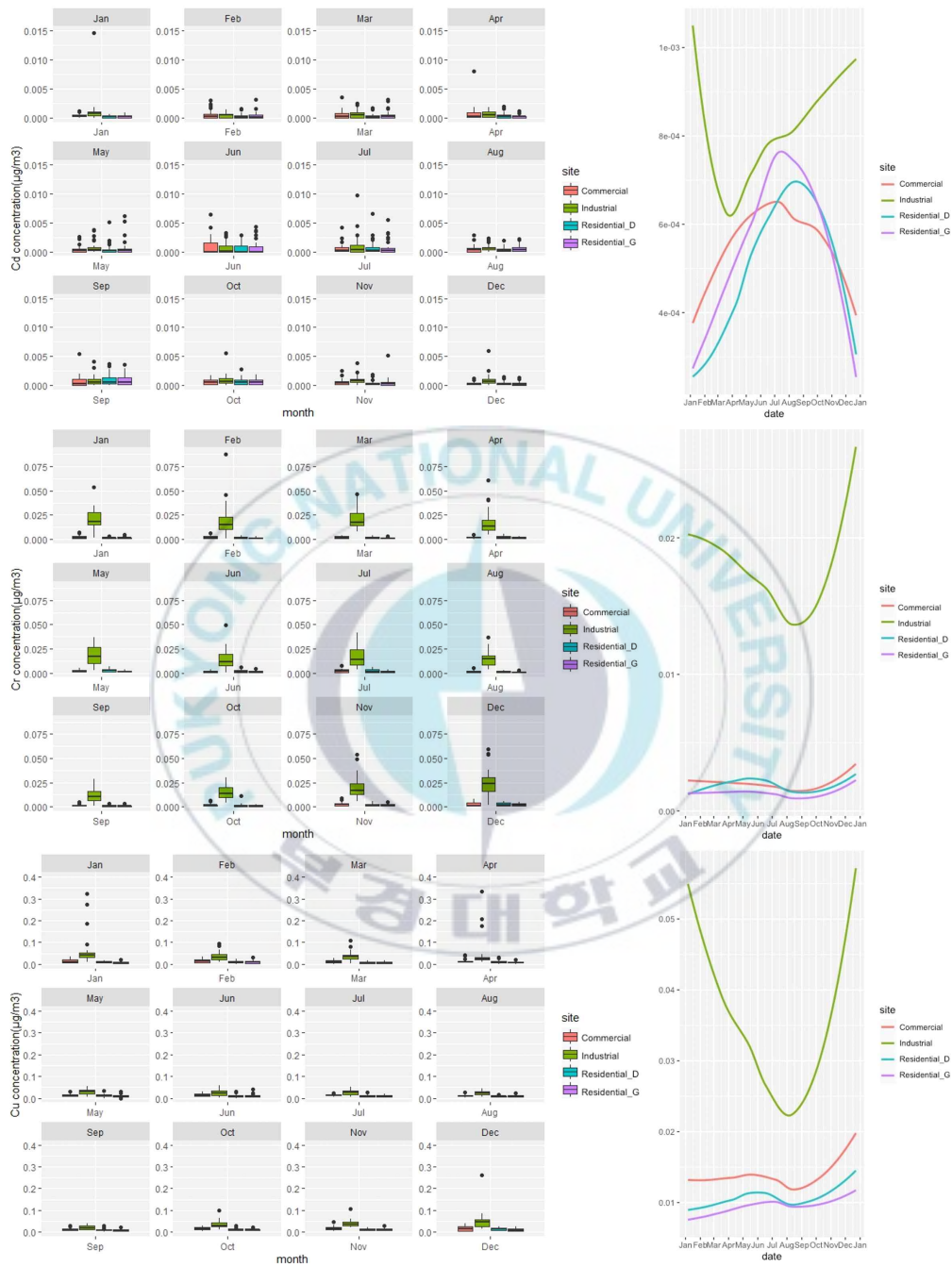


Fig. 4. Continued.

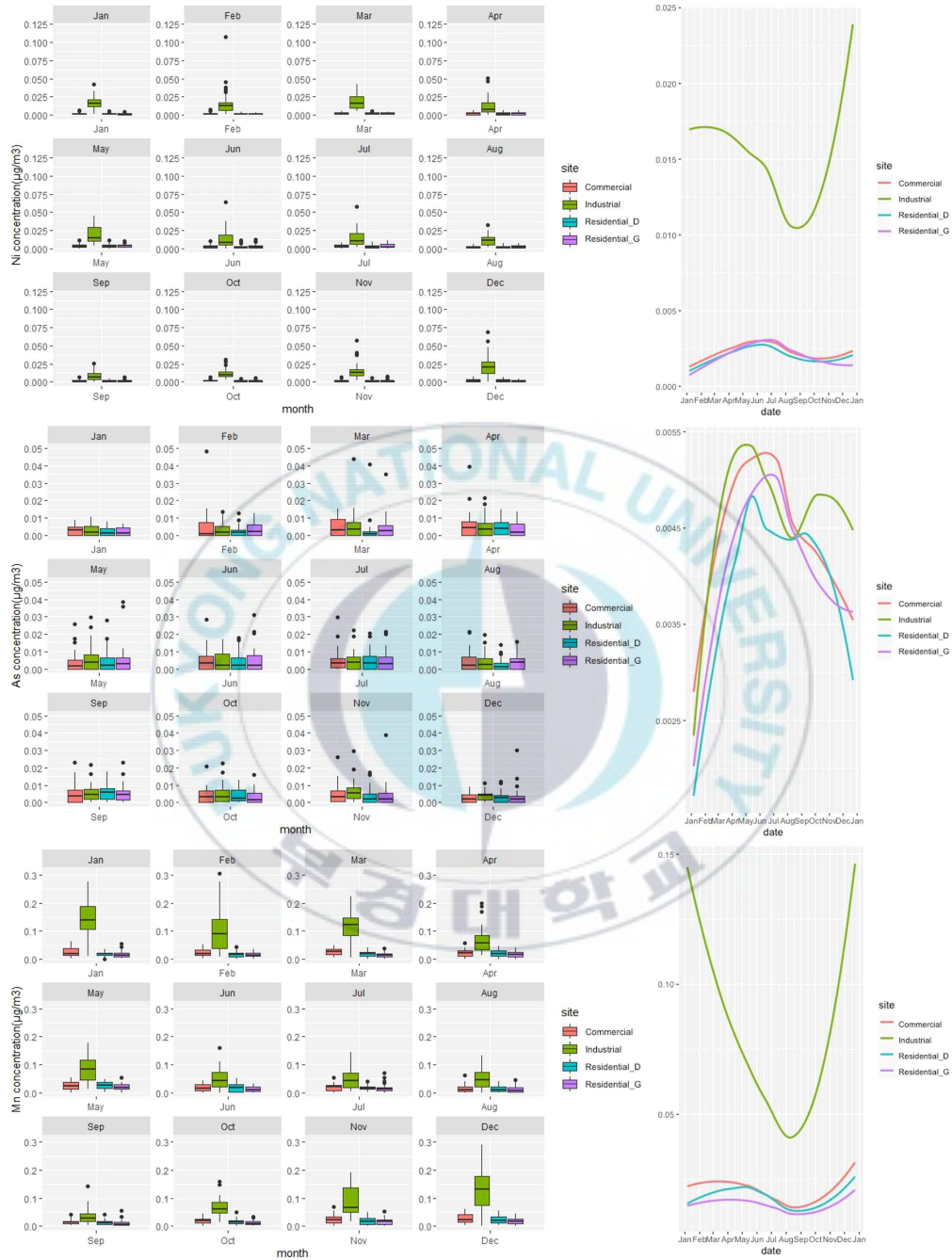


Fig. 4. Continued.

PM10, Pb, Cr, Cu, Ni, Mn은 겨울, 봄에 상승하고 여름부터 가을까지 하락하는 계절별로 유사한 경향을 보였다. 겨울과 봄에 화석연료의 사용 증가, 여름에는 강수에 의한 세정효과(washout)의 영향을 받는다고 추측할 수 있다. 겨울>봄>가을>여름 순의 농도 분포 특성은 서울(정종철, 2014)과 포항(백경민 등, 2019)의 선행연구와 일치하며, 대전(김지용 등, 2020)은 봄>겨울>가을>여름 순이었다.

Cd의 주 오염원은 공업지역이나 계절에 따라 공업지역보다 상업 및 주거지역이 고농도가 나타났으며 공업지역과 상업 및 주거지역은 확연히 다른 계절성을 보였다. 공업지역의 경우 봄~여름에 저농도를 보이다가 서서히 상승하여 겨울에 고농도를 보였다. 반면에 상업 및 주거지역의 경우 겨울~봄에 저농도에서 여름에 고농도로 나타났다. 이는 여름에 저농도인 PM10, Pb와는 다른 경향을 보였다.

Cr, Cu, Ni, Mn은 확장동 측정소가 주 오염원인 것을 알 수 있으며 12월~2월에 고농도를 보이다가 여름에 감소하는 뚜렷한 계절적 변화를 보였다. 또한 고농도의 상위값 이상치의 경우 점오염원에 의한 일시적인 현상으로 해석할 수 있다(김중수 등, 2014). 경기도에서는 Fe, Mn과 As가 비슷한 추세를 보였으나 부산의 As는 봄~여름에 고농도를 보이고, 가을~겨울 낮아지는 독특한 추세를 보였다. 계절에 따라 연산동 및 광안동 측정소 As가 확장동 측정소의 As보다 고농도를 보이는 경우가 보였는데 연산동 측정소에 As 관련 금속 산업체가 없으므로 다른 오염원이 원인으로 추정된다. As는 Cu 등과 달리 대부분 지역에서 계절과 관계없이 고루 발생하여 지역별 발생원 차이를 볼 수 없었으며 이는 공간적 특성보다 시간적(계절적) 특성에 영향을 받는다는 선행연구와 일치하였다.

### 3.3 지역별 농도 변화

R의 openair package에서 제공되는 TheilSen 함수는 기울기 추정치와 불확실성 계산하고 일반적으로 몇 년에 걸친 오염물질 농도의 추세를 결정하는 데 사용된다. Table 4와 Fig. 5은 TheilSen 함수로 작성된 추세 추정치이며, Units/year로 표시된다. 데이터는 95% 신뢰구간으로 작성되었으며 NA는 Kalman 필터와 Kalman Smooth를 사용하여 대체되고 LOESS를 사용해 비계절화된 추세를 보여준다.

Table 4. Trend estimates created by TheilSen function for PM10 and heavy metals by measuring site.

|               | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | $\text{ng}/\text{m}^3$ |       |       |       |       |       |       |
|---------------|--------------------------|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|               | PM10                     | Pb                     | Cd    | Cr    | Cu    | Ni    | As    | Mn    |
| Residential_G | +0.03                    | -0.34                  | +0.03 | +0.09 | +0.41 | -0.06 | -0.02 | +0.08 |
| Residential_D | -1.69                    | -0.78                  | +0.03 | +0.10 | -0.19 | -0.06 | -0.03 | -0.77 |
| Commercial    | -2.05                    | -0.66                  | +0.04 | +0.08 | +0.04 | -0.04 | +0.28 | -0.05 |
| Industrial    | -2.25                    | -3.36                  | -0.03 | -1.01 | -2.00 | -1.03 | -0.03 | -3.24 |

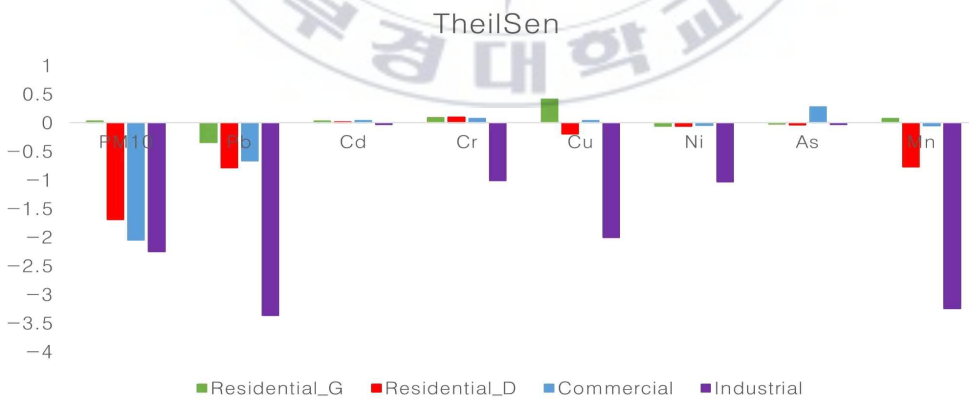


Fig. 5. Trend estimates created by TheilSen function for PM10 and heavy metals by measuring site.

미세먼지와 중금속은 미세먼지 관리 강화대책 및 비상저감조치, 계절관리제 등 매년 강화되는 관리와 점검을 통해 2014년 이후 감소추세가 나타날 거라 예상하였으나 광안동과 연산동에서 증가추세인 중금속 요소가 확인되었다. 광안동 측정소에서 PM10(+0.03), Cd(+0.03), Cr(+0.09), Cu(+0.41), Mn(+0.08)이 상승추세며 모든 측정소 중 가장 많은 증가추세를 보였다. 이 중 Cu이 가장 큰 증가폭을 보였는데, Cu는 제조 및 전기 도금과 같은 산업지역에서 배출되거나 디젤 엔진 및 브레이크 차량의 마모 등의 차량 배출과 관련이 있다(Men et al., 2018; Sah et al., 2019). 광안동 측정소 인근 Cu 배출 산업시설이 없어 브레이크 차량 마모와 비배기 배출로 인한 Cu의 고농도로 판단된다.

덕천동 측정소는 같은 주거지역인 광안동 측정소와 비교하여 PM10(-1.69), Cu(-0.19), Mn(-0.77)이 반대로 감소추세를 보였으며 Pb의 경우 광안동 측정소(-0.34)보다 덕천동 측정소(-0.78)에서 더 많이 감소하였다.

연산동 측정소는 Cd(+0.04), Cr(+0.08), Cu(+0.04), As(+0.28)가 상승추세임을 볼 수 있으며, 학장동 측정소는 PM10(-2.25)과 모든 중금속 Pb(-3.36), Cd(-0.03), Cr(-1.01), Cu(-2.00), Ni(-1.03), As(-0.03), Mn(-3.24)이 감소추세였고 다른 지역에 비해 가장 큰 폭으로 감소한 것으로 나타났다.

### 3.3.1. 상관분석

상관분석에 대한 시각화를 위해 R corrplot package를 사용하였고 Fig. 6에 PM10과 대기중금속 간의 상관계수를 나타내었다. NA값은 제외하고 유의확률은 0.01로 지정하였다.

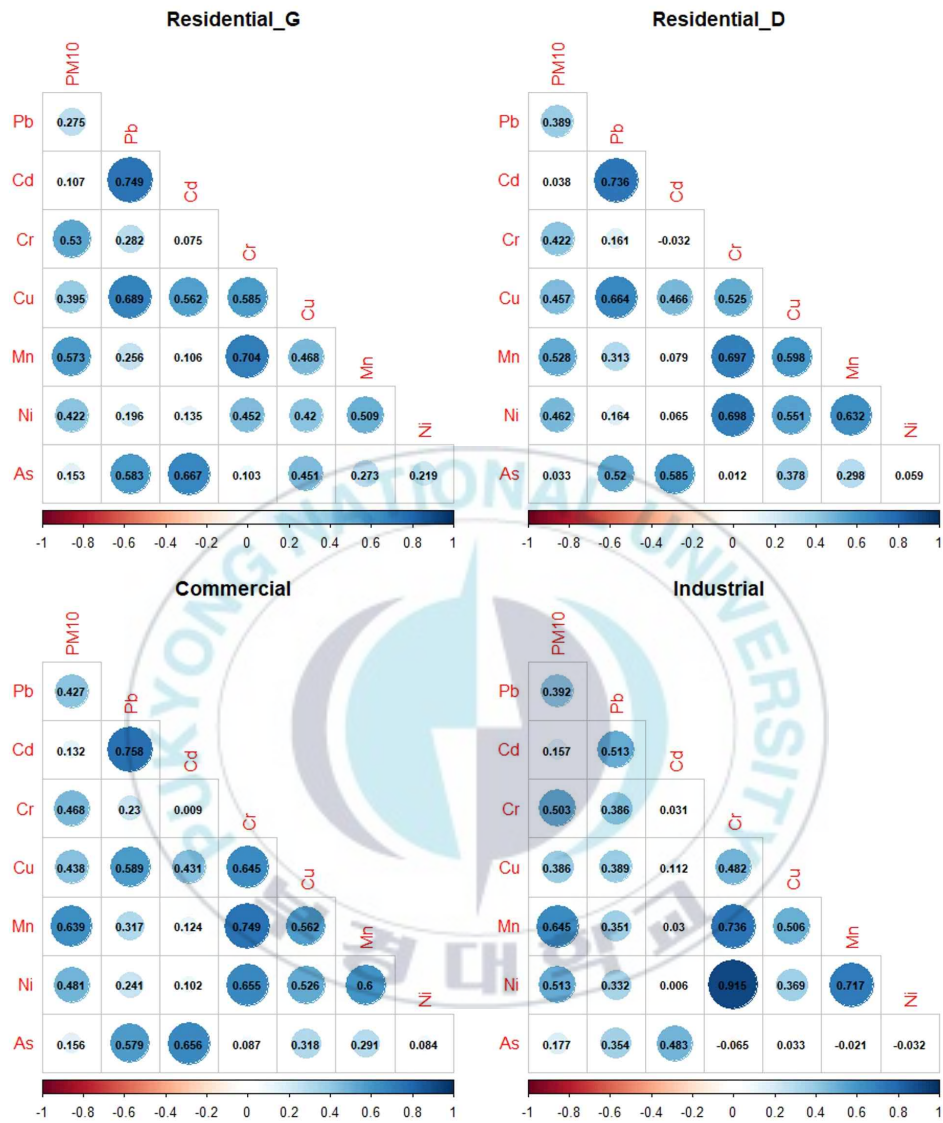


Fig. 6. Visualization of the correlation between PM10 and heavy metals for each measuring station using R's corrplot package. The darker the color, the stronger the correlation.

광안동 측정소는 Pb-Cd 0.749, Cr-Mn이 0.704로 강한 양의 상관관계를 보였다. 광안동 측정소에서 큰 폭으로 증가추세를 보인 Cu의 경우 모든 항목과 양의 상관관계를 보였다. 광안동 측정소는 주거지역으로 분류되어 인근에 공장지대가 없으며 관광지이기 때문에 대부분의 중금속 배출원은 자동차 교통량, 타이어와 브레이크 패드 마모 등과 관련이 있을 것으로 보인다.

덕천동 측정소의 경우 Pb-Cd 0.736, Pb-Cu 0.664, Cr-Ni 0.698, Cr-Mn 0.697로 강한 양의 상관관계를 보였다. Cr-Ni는 주로 도금관련 업종에서 발생하는 것으로 알려져 있으며, 주거지역인 덕천동 측정소에는 해당 시설이 없으므로 자동차로 인한 연소, 난방에 의한 연료연소가 원인으로 보인다(Sah et al., 2019).

연산동 측정소에서 Pb-Cd 0.758, Cr-Mn이 0.749로 강한 양의 상관관계를 보였으며 Cd를 제외하고 Cu가 모든 요소와 양의 상관관계를 보였다. TheilSen에서 보인 상승추세의 As는 As-Pb 0.579, As-Cd 0.656 외에 상관관계를 보이는 요소가 없다. As와 Pb, Cd는 석유와 석탄을 사용하는 보일러 및 주택 단위의 연소에서 발생하는 중금속으로 알려져 있다(Huang et al., 1994; Pacyna et al., 2007).

학장동 측정소는 주물, 기계, 도금, 철강 유통 단지가 밀집한 공업시설로 그와 관련된 중금속을 확인할 수 있다. Cr-Ni 0.915, Cr-Mn 0.736, Ni-Mn 0.717로 강한 양의 상관관계를 보였다. Pb는 모든 유해중금속과 양의 상관관계를 보이는 특징이 있었다. 학장동 측정소는 금속 및 도금 관련 업체가 40.9%를 차지하는 만큼 관련된 산업 활동으로 Cr, Ni, Mn의 상관관계가 높은 것을 볼 수 있다. 강한 양의 상관관계를 보이는 4개 항목을 타지역 산업단지의 상관관계와 비교하였을 때, 시화 산업단지(강병욱 등, 2018)에서 Cr-Ni 0.88, Cr-Mn 0.74, Ni-Mn 0.86, PM10-Mn 0.65, TSP-Ni 0.48, 울산(나덕재와 이병규, 2000)에서 각각 0.85, 0.79, 0.82, 0.50, 0.40, 대전(김지용 등, 2020)에서 각각 0.648, 0.71, 0.765, 0.724, 0.663으로 일치하는 경향이 있었다. 경기도(김중수 등, 2014)의 경우 PM10-Mn(0.82), PM10-Ni(0.51), Ni-Mn(0.70)으로 유사하나 Cr-Ni(0.34), Cr-Mn(0.30)의 경우 상관관계수가 낮아 지역별 차이가 있었다.



### 3.3.2 주거지역

TheilSen 함수로 작성된 추세 추정치(Table 4와 Fig. 5)에서 덕천동과 광안동은 같은 주거지역임에도 PM10, Pb, Cu, Mn의 값이 큰 차이를 보였다. 이는 주거밀집지역과 관광지의 차이인 것으로 파악된다. 두 지역의 차이를 파악하기 위해 한국관광공사의 지역별 방문자 수를 조회 가능한 2018년부터 2020년까지 취합하여 분석하고 Fig. 7에 나타내었다. 덕천동은 북구, 광안동은 수영구의 하위 행정구역으로, 방문자 수는 해당 지역의 외부인 방문자(외지인 방문자+외국인 방문자)의 합계로 이동통신 데이터를 기반으로 결정되었다.

같은 주거지역이라 하더라도 주거밀집지역에 위치한 덕천동 측정소와 관광지에 위치한 광안동 측정소의 방문자 수는 7월에 최대 2배, 12월에 최소 1.3배 차이가 난다. 자세한 수치는 표로 부록(Appendix 1)에 정리하였다.



Fig. 7. The number of visitors from 2018 to 2020 in Buk-gu and Suyeong-gu provided by the 'Korea Tourism Data Lab'. It is based on outside visitors (domestic visitors + foreign visitors) as mobile communication data.

관광지, 특히 교통량이 많은 곳에서는 Zn, Pb, Cd가 고농도를 보인다 (Men et al., 2018; Wang et al., 2013). Fig. 8은 각 지점별 교통량으로, '부산광역시 차량교통 조사내역 용역 보고서'의 2014년부터 2020년까지 지점별 16시간(0600~2200 기준) 측정 자료를 사용하였다. 자세한 내용은 부록(Appendix 2)에 나타내었다. 차도는 측정소를 중심으로 3km 이내로 한정하였다. 덕천동 측정소 중심 3km 이내에서 덕천교차로, 구만덕로, 만덕대교가 선정되었으며 각각 평균 59,283대, 22,962대, 77,598대의 교통량을 보였다. 광안동 측정소 중심 3km 이내 대남교차로, 광남로, 센텀시티교차로, 수영교차로, 센텀북대교가 있으며 각각 평균 140,642대, 30,359대, 100,768대, 70,712대, 26,107대의 교통량을 보였다.

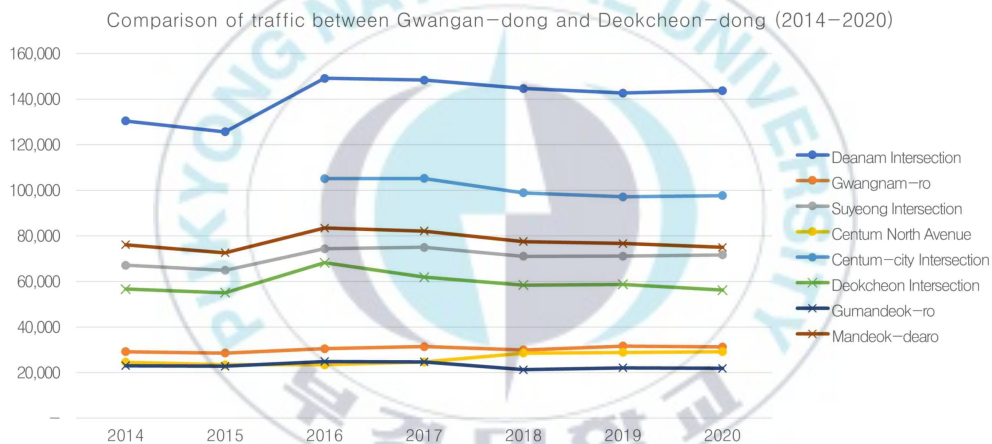


Fig. 8. Comparison of traffic between Gwangnan-dong and Deckcheon-dong (2014~2020).

덕천동 측정소에 비해 광안동 측정소 부근이 측정 가능한 차도도 많고 교통량이 전체 평균 1.3배 차이가 난다.

방문자 수와 교통량을 비교하였을 때 두 지역은 주거밀집지역과 관광지로서 차이점이 있으며 두 지점 간 중금속 추세의 차이는 차량 배출, 비배기 배출에 영향을 받았을 것으로 판단된다.

### 3.3.3 상업지역

TheilSen의 함수를 사용하여 나타낸 그래프(Fig. 5)에서 연산동 측정소의 As가 큰 폭으로 증가한다. 또한 계절별 그래프(Fig. 4)에서 기상 조건의 영향으로 일반적으로 겨울에는 높고 여름에는 낮은 추세를 보이는 대기 중금속 농도 분포(Huang et al., 1994)와 반대로 나타난 이유를 알아보기 위해 R의 open air package와 AWS 데이터를 사용하여 풍향, 풍속에 따른 As 농도 분석을 진행하였다. AWS 자료는 연산동 측정소가 위치한 곳에서 가장 가까운 동래구(940)의 시간별 자료를 평균하여 월평균으로 사용하였다.

비소는 석탄 연료 발전소와 구리 및 Pb 제련소, 제련 공정, 철강 산업, 폐기물 취급 및 처리, 목재산업, 소결 공정, 살충제 사용 등 다양하게 발생하며 특히 석탄 소비와 연관이 있으며 안티몬(Sb)과 함께 석탄 연소의 추적자로 간주된다(최성화 등, 2021; Hsu et al., 2017). 영국에서는 석탄 사용량이 감소하고 천연가스의 사용량이 증가하면서 As의 추세는 감소하고 있고, 석탄 사용량이 많은 중국에서는 셀레늄(Se), 몰리브덴(Mo), 카드뮴(Cd)과 함께 석탄 소비가 증가하는 겨울이 난방을 하지 않는 계절보다 2배 이상 농도가 높았다(Huang et al., 1994; Maggs, 2000).

Polar plot은 풍속과 풍향에 따라 달라지는 농도를 표현하는 농도의 이변량 극좌표 플롯이며, pollution rose는 wind rose의 변형으로 바람의 방향에 따라 오염물질 농도를 고려할 때 사용한다(Carslaw and Ropkins, 2012). 어떤 바람 방향이 전체 농도에 가장 많이 기여하는지 다양한 농도 수준에 대해 알아보기 위해 옵션 statistic= "prop.mean" 을 사용하였다.

그림(Fig. 9)의 (a) polar plot와 (b) pollution rose에서 연산동 측정소의 As는 북쪽과 남쪽에 각각 오염원이 있으며, 농도를 제어하는 풍향을 볼 수 있다. 가장 높은 As 농도는 강한 풍속의 북풍, 낮은 풍속의 남풍과 관련이 있었으며 북풍이 꾸준히 As의 농도를 증가시키고 있으나 겨울의 경우 그 기여도가 미미했다. 봄과 여름에는 주로 남풍과 북풍이 함께 영향을 주었고, 가을에는 북풍이 매우 우세해진다. 측정소 북쪽과 남쪽에 위치한 차도에서의 도로 교통 배출 및 건물 난방이 As 증가에 기여한 것을 알 수 있다. 다만 교통량(Appendix 2)과 상관분석(Fig. 6) 결과, As의 추세

를 지배적으로 결정짓는 오염원이 있다고 보기 어려우며 이는 독립적인 오염원이 있거나 복합적인 작용으로 인한 것으로 볼 수 있다(이소림 등, 2007; 정기호 등, 2006).

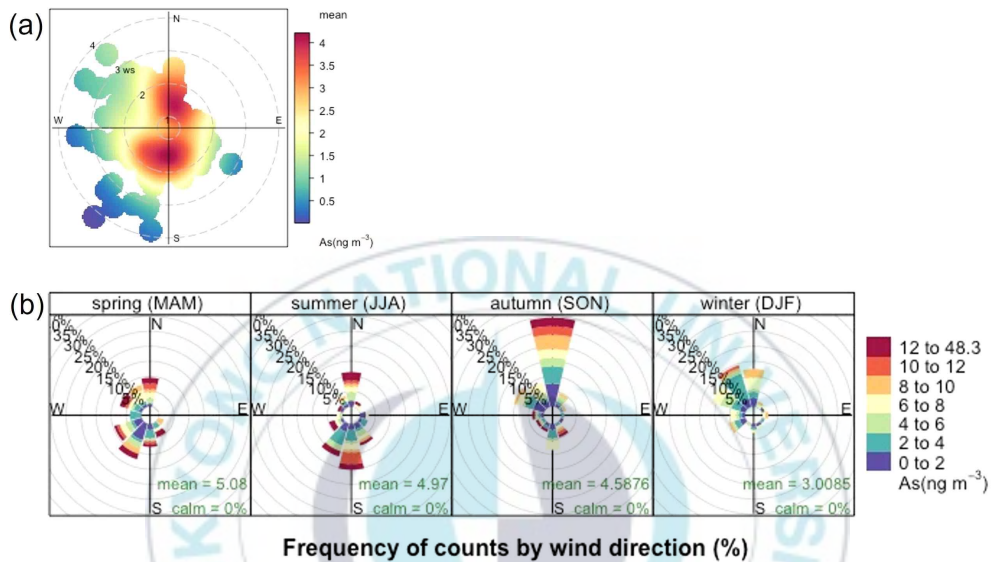


Fig. 9. As concentrations(ng/m<sup>3</sup> ) at the commercial site.  
 (a) Polar plot, (b) Pollution rose as frequency of counts according to wind direction (%) near Yeonsan-dong.

### 3.3.4 공업지역

공업지역 학장동 측정소가 위치한 사상공업단지는 한국산업단지공단 산업동향 조사에서 공장가동률 확인이 불가능하며 약 61%에 해당하는 미등록 공장과 9인 이하 사업장이 많아 정확한 통계자료가 없으므로 간접적으로 '사상구 통계연보'를 통해 사업체 수와 종사자 수를 확인하였다. 사상공업단지의 가장 많은 면적을 차지하는 감전동과 학장동의 자료를 수집하였고 표(Table 5)에 나타내었다.

감전동과 학장동의 사업체 수와 종사자 수는 2016년 최고치를 찍고 이

후 2019년까지 하락세를 보이다가 2020년 반등한다. 측정소의 대기중금속 결과는 상대적으로 가장 큰 폭으로 감소하는 추세를 보이는 것과 다르게 사업체 수와 종사자 수가 큰 폭으로 증가하였다. 이는 2020년 기준 경제총조사부터 별도의 사업장 없이 영업하는 사업장도 대상에 포함되었기 때문으로 사료된다.

데이터 수집 기준이 달라진 2020년 데이터를 제외하고 2014년부터 2019년까지 감전동과 학장동의 사업체 수와 종사자 수의 데이터를 정규화하여 그림 (Fig. 10)에 나타내었다. 감전동과 학장동 사업체 수와 종사자 수는 2016년 이후 감소하는 대기중금속과 PM10 추세가 일치하며 (Fig. 3), 따라서 실제 공장가동률 또한 낮아졌다 예상할 수 있으며 동시에 공장가동률이 낮아진다면 제조업 위주의 공단지역에서 주로 발생하는 Cr, Ni, Cu, Mn 등이 영향을 받아 감소했다는 것을 알 수 있다.

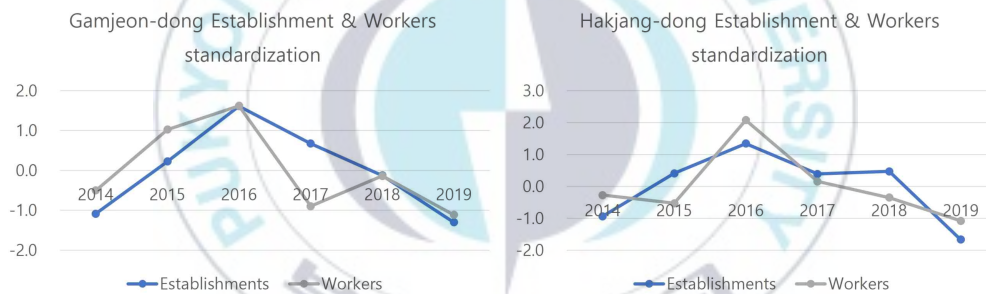


Fig. 10. Number of Establishments & Workers, by Industry (Gamjeon-dong and Hakjang-dong).

Table 5. Number of Establishments & Workers, by Industry of Gamjeon-dong and Hakjang-dong sites from 2014 to 2020. (Collection of 'Sasang-gu Statistical Yearbook' published from 2015 to 2021)

| Number of Establishments & Workers, by Industry |                 |         |                    |         |                    |         |   |         |
|---|-----------------|---------|--------------------|---------|--------------------|---------|---|---------|
| Year  | Sasang-gu total |         | Gamjeon-dong total |         | Hakjang-dong total |         | Percentage of total<br>(Gamjeon-dong and<br>Hakjang-dong) (%) |         |
|   | Establishments  | Workers | Establishments     | Workers | Establishments     | Workers | Establishments  | Workers |
| 2014  | 28,341          | 124,584 | 5,545              | 26,634  | 3,259              | 19,127  | 31.1  | 36.7    |
| 2015  | 28,366          | 126,209 | 5,612              | 27,387  | 3,324              | 19,075  | 31.5  | 36.8    |
| 2016  | 28,581          | 127,730 | 5,683              | 27,681  | 3,369              | 19,607  | 31.7  | 37.0    |
| 2017  | 28,599          | 124,867 | 5,635              | 26,440  | 3,323              | 19,214  | 31.3  | 36.6    |
| 2018  | 28,388          | 124,363 | 5,594              | 26,814  | 3,327              | 19,111  | 31.4  | 36.9    |
| 2019  | 28,335          | 123,719 | 5,534              | 26,334  | 3,224              | 18,963  | 30.9  | 36.6    |
| 2020  | 36,946          | 125,635 | 8,146              | 27,143  | 4,081              | 19,807  | 33.1  | 37.4    |

### 3.4. ETS / LSTM

2014년부터 2020년의 PM10과 중금속 자료로 2021년을 예측하기 위해 R의 forecast package의 ETS와 tensor flow, keras package를 이용하여 LSTM 예측을 실시하고 예측정확도를 비교하였다.

오종민 등 (2017)은 시계열분석을 위한 통계분석으로 가변수 회귀분석, 지수평활, ARIMA, 상태공간지수평활(ETS 방법), 시계열분해(STL 방법)을 적용하였고 그 중 ETS의 성능이 가장 좋은 것으로 나타났다. Ki-Hong Shin (2021)은 딥러닝 예측을 위해 인공신경망(ANN), 심층신경망(DNN), 최적학습기계(ELM), 장단기 기억망(LSTM), 장단기 기억-펄스 연결망(LSTM-PC) 다섯 가지 신경망 알고리즘을 시뮬레이션한 결과, LSTM이 시계열 데이터로 성능이 가장 좋아 선형과 비선형 모델로 각각 ETS와 LSTM을 사용하였다.

2014년 1월부터 2020년 12월까지 총 84개의 월평균 데이터( $\text{ng}/\text{m}^3$ )를 사용하여 다음 해 1년(2021년)을 예측하고 실측값과 비교하였으며 기존 데이터의 NA는 NA를 제외한 평균으로 대체하였다. ETS의 신뢰구간은 80~95% 신뢰구간을 나타낸다.

연도별 및 계절별 추세 그래프에서 시간에 따라 비슷한 추세를 보이거나 측정소별로 지점 고유의 특징을 설명할 수 있는 대기중금속이 있었으며, 이를 지점을 대표하는 중금속으로 선별하여 예측 데이터를 생성하였다.

먼저 각 측정소를 대표하는 중금속을 선정하기 위해 2014년~2020년 전체 데이터를 평균한 후 정규화하여 방사형 그래프(Fig. 11)로 나타내었으며 그 자료는 Table 6에 나타내었다.

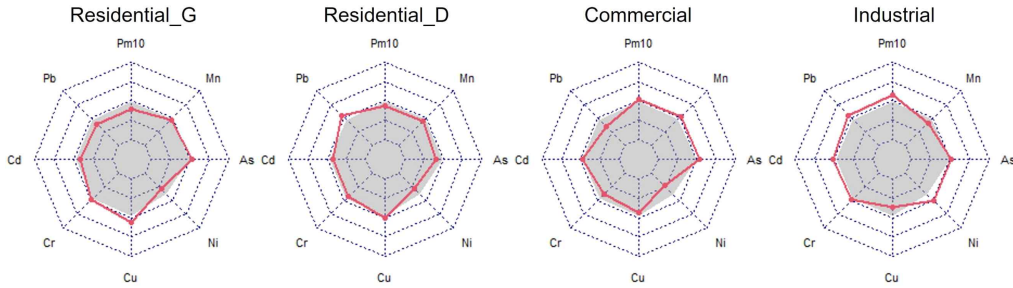


Fig. 11. Radar graph normalized with annual average values of PM10 and heavy metal data. The gray part represents the average data, and the red line represents the data of the measuring site.

Table 6. Annual averaged and normalized data for PM10 and heavy metals.

|               | PM10 | Pb          | Cd   | Cr   | Cu          | Ni          | As          | Mn   |
|---------------|------|-------------|------|------|-------------|-------------|-------------|------|
| Average       | 0.49 | 0.47        | 0.47 | 0.47 | 0.48        | 0.39        | 0.50        | 0.47 |
| Residential_G | 0.39 | 0.39        | 0.42 | 0.49 | <b>0.56</b> | 0.29        | 0.53        | 0.47 |
| Residential_D | 0.44 | <b>0.55</b> | 0.43 | 0.43 | 0.50        | 0.29        | 0.41        | 0.44 |
| Commercial    | 0.52 | 0.34        | 0.48 | 0.39 | 0.44        | 0.22        | <b>0.53</b> | 0.52 |
| Industrial    | 0.58 | 0.55        | 0.51 | 0.49 | 0.37        | <b>0.51</b> | 0.51        | 0.41 |

오차, 추세, 계절성을 모두 나타낸 상태공간모델은 광안동 ETS(A,A,A), 덕천동 ETS(M,A<sub>d</sub>,M), 연산동 ETS(A,A<sub>d</sub>,A), 학장동 ETS(M,A,M)로 작성하였다. 여기서 오차(덧셈오차, 곱셈오차) 상태의 차이점은 데이터가 분명하게 양수이고 0이나 음수값이 존재하지 않는 것이며, 추세 상태에서 Ad는 감쇠추세를 나타낸다. 계절성 변동에서 덧셈기법은 시계열 전반에 걸쳐 거의 일정할 때, 곱셈기법은 계절성 변동이 시계열 수준에서 비례하게 변할 때 사용한다.

시계열이 있는 큰 시퀀스가 주어지면 시퀀스 간의 종속성을 찾는 LSTM 모델을 처리해야 하는데 이때 상태 저장 LSTM(Stateful LSTM)을 사용한다(Bulín et al., 2019). Stateful LSTM은 각 샘플의 마지막 상태가 다



음 배치 인덱스 샘플에 대한 초기 상태로 사용되며, 모든 상태가 다음 배치로 전파되는 특징이 있다. Keras LSTM은 3D 배열 모양의 특징 tensor 형식 [sample, timesteps, features]을 취하는 특징이 있다.

2021년 한 해를 예측하기 위해 12개의 데이터 포인트가 필요하다. sample 1, time steps 12로 설정하고 epoch를 20, 100, 1000, 2500으로 증가시키면서 RMSE를 비교한 결과 epoch가 클수록 정확도가 증가하는 것을 확인한 후 epochs=2500으로 결정하였다. Loss 함수는 MAE(mean absolute error), 최적화함수는 adam, 측정기준은 정확도 (accuracy)를 사용, 시계열 시퀀스를 유지하기 위해 shuffle=FALSE를 설정하고 예측을 수행하였다. 모델의 성능을 확인하기 위해 예측모형의 성능지표로 MSE(Mean Squared Error), MAE(Mean Absolute Error), RMSE(Root Mean Squared Error)를 사용하였으며 각각 수식은 다음과 같다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i^N (prediction_i - actual_i)^2}$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_i^N |prediction_i - actual_i|$$

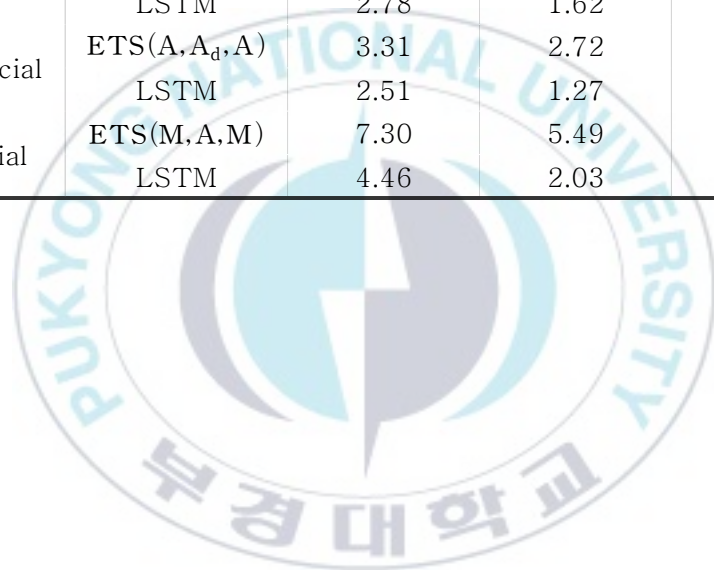
$$MAPE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{prediction_i - actual_i}{actual_i} \right|$$

성능지표를 사용한 각 측정소별 ETS와 LSTM 비교는 표(Table 7)에 나타내었다. 광안동 측정소 Cu의 경우 RMSE에서 ETS(A,A,A)가 2.81, LSTM이 1.99, MAE에서 ETS가 2.35, LSTM이 1.12, MAPE에서 ETS가 32.18, LSTM이 14.99 나왔다. 덕천동 측정소 Pb의 경우 RMSE에서 ETS(M,A<sub>d</sub>,M) 5.55, LSTM이 2.78, MAE에서 ETS 4.16, LSTM이 1.62, MAPE에서 ETS 42.77, LSTM 13.93이 나왔다. 연산동 측정소 As의 경우 RMSE에서 ETS(A,A<sub>d</sub>,A) 3.31, LSTM이 2.51, MAE에서 ETS가 2.72, LSTM이 1.27이 나왔다. 학장동 측정소 Ni의 경우 RMSE에서 ETS(M,A,M) 7.30, LSTM이 4.46, MAE에서 ETS 5.49, LSTM이

2.03, MAPE에서 ETS 49.36, LSTM이 12.70으로 나왔다. 모든 성능지표에서 LSTM이 가장 좋은 성능을 보였다.

Table 7. Comparison of performance indicators RMSE, MAE, and MAPE by measurement site (Inf : Estimate > 0).

| Site          | method                   | RMSE | MAE  | MAPE  |
|---------------|--------------------------|------|------|-------|
| Residential_G | ETS(A,A,A)               | 2.81 | 2.35 | 32.18 |
|               | LSTM                     | 1.99 | 1.12 | 14.99 |
| Residential_d | ETS(M,A <sub>d</sub> ,M) | 5.55 | 4.16 | 42.77 |
|               | LSTM                     | 2.78 | 1.62 | 13.93 |
| Commercial    | ETS(A,A <sub>d</sub> ,A) | 3.31 | 2.72 | Inf   |
|               | LSTM                     | 2.51 | 1.27 | Inf   |
| Industrial    | ETS(M,A,M)               | 7.30 | 5.49 | 49.36 |
|               | LSTM                     | 4.46 | 2.03 | 12.70 |



## 4. 결론

부산광역시 보건환경연구원에서 제공하는 대기중금속 데이터를 활용하여 주거지역 광안동 측정소와 덕천동 측정소, 상업지역 연산동 측정소, 공업지역 학장동 측정소에서 PM10과 대기중금속 7종(Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, As, Mn)의 2014~2020년까지 7년간의 시간적 추세를 분석하였다. 또한 2014~2020년 데이터를 이용하여 2021년 추세를 ETS와 LSTM으로 예측하고 그 정확도를 분석하였다.

### 1) 연도별 변화

연간추세에서 PM10은 2016년과 2019년에 고농도 추세를 보이는 양상이 있지만 2014년과 비교해서 감소추세임이 확인되었으며, 공업지역에서 모든 중금속이 감소추세를 보였다. Pb와 Ni은 PM10과 유사한 감소추세를 보이며 모든 지점에서 2014년에 비해 농도가 감소하는 특징이 있었다. Cd, Cr, Cu, Mn의 경우 2016년 이후 주거 및 상업지역이 공업지역보다 큰 폭의 상승추세를 유지하는 경향이 있었다. Cd와 As는 모든 지점에서 연간 비슷한 농도의 추세를 보이며 증감을 반복하였다.

### 2) 계절적 변화

PM10, Pb, Cr, Cu, Ni, Mn은 지역 구분 없이 겨울>봄>가을>여름 순의 농도 분포를 보이며 겨울~봄에 상승하고 여름~가을 하락하는 뚜렷한 계절적 추세를 나타내었다. Cd는 지역별, 계절별 차이가 있었으며 공업지역의 경우 봄~여름에 저농도에서 겨울에 고농도를, 상업 및 주거지역은 겨울~봄에 저농도에서 여름에 고농도를 보였다. As는 봄~여름에 상승하고 가을~겨울에 낮아지는 독특한 추세를 보이며 지역별 차이가 없었다.

### 3) 지역별 변화와 상관분석

TheilSen으로 계산된 지역별 추세에서 PM10과 대기중금속은 학장동 측정소에서 가장 크게 감소하였으며, 반대로 광안동 측정소에서 큰 증가추세(PM10, Cd, Cr, Cu, Mn)를 보였다. 같은 주거지역임에도 관광지인 광안동 측정소와 주거밀집지역 덕천동 측정소의 중금속 추세 증감 차이가

나타났다. 연산동 측정소에서는 측정소 중 유일하게 As가 상승추세를 보였다. 상관분석에서 모든 측정소에서 Pb-Cd, Cr-Mn이 양의 상관관계를 보였으며, 지점별 특징이 나타났다.

#### 4) 주거지역

주거지역이면서 관광지와 밀접한 광안동 측정소의 경우, 교통량으로 인한 Cu 상승이 확인되었다. 2016년부터 2020년까지의 ‘부산광역시 차량 교통 조사내역 용역보고서’를 취합하여 분석한 결과, 광안동 측정소의 경우 다른 지역에 비해 측정소 인근 차도가 많고 교통량이 소폭 증가했음을 확인하였다. 인근 Cu를 방출하는 공업 및 상업지역이 없으므로 Cu의 증가 추세는 교통량의 영향을 받았음을 알 수 있었다.

주거밀집지역 덕천동 측정소는 TheilSen 추세분석에서 PM10, Pb, Cu, Mn이 감소추세를 보였으며 같은 주거지역인 광안동 측정소와 반대되는 결과로 이는 관광지와 주거밀집지역의 차이로 볼 수 있었다. 상관분석에서 Pb-Cd, Pb-Cu, Cr-Ni, Cr-Mn이 강한 양의 상관관계를 보였는데 이중 Cr-Ni은 관련 공업시설에서 발생하는 것으로 알려져 있으며 주거지역인 덕천동 측정소에는 해당 시설이 없으므로 자동차로 인한 연소가 원인으로 보인다.

#### 5) 상업지역

상업지역 연산동 측정소의 경우 As의 독특한 상승추세가 확인되었다. 상관분석에서 As는 Pb 및 Cd와 양의 상관관계가 나타났으며, 배출원을 확인하기 위해 AWS 데이터를 사용하여 풍향풍속을 분석한 결과, 측정소 인근에서 As가 고농도를 보이는 현상을 확인하였다. 따라서 As가 도로 교통 배출 및 건물 난방에 영향을 받은 것으로 사료된다.

#### 6) 공업지역

사상공업단지에 위치한 공업지역 학장동 측정소에서는 Cr, Cu, Ni, Mn이 지배적인 오염배출원으로 파악되었으며 추세분석에서 모든 대기중금속과 PM10이 감소하는 특징이 있었다. 특히 PM10, Pb, Cr, Cu, Ni, Mn이 가장 큰 폭으로 감소하였다. 사상구 통계연보에서 사상공업단지(감전동,

학장동)의 자료를 수집하여 공업단지의 공장가동률을 간접적으로 확인하였다. 사상구 통계연보에서 자료 수집 기준이 달라진 2020년을 제외하고 사업체 수 종사자 수는 2016년까지 증가한 후 2019년까지 하락세를 보였으며 이는 학장동 측정소에서 주로 배출되는 Cr, Cu, Ni, Mn의 연간추세와 일치하였다.

#### 7) ETS / LSTM

2014년~2020년까지 PM10과 중금속의 연평균 자료를 정규화하여 각 지역을 특징할 수 있는 중금속을 선별하고 ETS과 LSTM을 사용하였다. 광안동 Cu, 덕천동 Pb, 연산동 As, 학장동 Ni을 선정하여 각각 ETS(A,A,A), ETS(M,A<sub>d</sub>,M), ETS(A,A<sub>d</sub>,A), ETS(M,A,M)으로 LSTM과 비교하였다. 2014년~2020년 자료를 학습하여 2021년 월별 12개의 자료를 예측한 결과 모든 성능지표에서 LSTM이 좋은 결과를 보였다.

본 연구에서 얻어진 부산광역시의 PM10과 중금속 시계열 분석 및 LSTM 기법 결과는 향후 부산지역 대기질의 장기적 개선을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 참고문헌

- 강병욱, 김민지, 백경민, 서영교, 이학성, 김종호, 한진석, and 백성욱. "국내 주요 산업단지 대기 중 중금속농도 분포에 관한 연구." *한국대기환경학회지* (국문) 34, no. 2 (2018): 269-80.
- 권혜지 and 김용구. "통계적 모형을 이용한 대기중 망간 농도 예측." *한국데이터정보과학회지* 27 no. 3 (2016): 577-586.
- 김영희, and 장관중. "딥러닝 알고리즘 기반의 초미세먼지 (PM2.5) 예측 성능 비교 분석." *융합정보논문지* 11, no. 3 (2021): 7-13.
- 김종수, 홍순모, 김명숙, 김요용, and 신은상. "통계분석을 이용한 경기도 대기 중 미세먼지 및 중금속 분포 특성." *한국대기환경학회지* 30, no. 3 (2014): 281-90.
- 김지용, 허술, 이승근, and 유병로. "통계분석을 이용한 대전지역 미세먼지 (PM10)의 중금속 및 이온 성분 특성 연구." *한국환경기술학회지* 21, no. 1 (2020): 64-71.
- 나덕재, and 이병규. "산업도시 대기 중 PM10 의 농도 및 금속원소 성분의 특성 연구." *한국대기환경학회지* 16, no. 1 (2000): 23-35.
- 박선엽. "코로나바이러스감염증 2019(코로나19) 확산과 대기 중 PM10 및 PM2.5 농도 변화 간의 연관성: 대구광역시 사례 분석." *대한지리학회지* 55 no. 5 (2020): 453-65.
- 박선엽. "다중 스케일 접근을 통한 부산광역시 대기 중 미세먼지 (PM10) 및 초미세먼지 (PM2.5) 농도의 국지적 특성 분석." *국토지리학회지* 55, no. 3 (2021): 321-34.
- 박은정, 강미선, 유대은, 김대선, 유승도, 정규혁, and 박광식. "서울북부 지역 미세먼지에 함유된 유해 중금속의 분석 및 건강위해성평가." *Environmental Health and Toxicology* 20, no. 2 (2005): 179-86.
- 백경민, 서영교, 정동희, and 백성욱. "포항지역 대기 중 다환방향족탄화수소 및 중금속의 농도분포 특성." *한국대기환경학회지* 35, no. 5 (2019): 533-54.
- 서양모. "LSTM 모델 기반 서울시 미세먼지 농도 예측 정확도 분석." 세종대학교 대학원, 2019

- 송금주, 문영훈, 주종호, 이아영, 권도형, 김영희, and 석광설. "1 차 비철 금속제련시설에서의 납과 카드뮴 분포특성." *한국환경분석학회지* 19, no. 3 (2016): 171-81.
- 심혜민, and 김은정. "코로나 19 이후 도시 교통량 및 미세먼지 변화-1차 유행기의 서울시를 대상으로." *한국도시지리학회지* 24, no. 2 (2021): 147-58.
- 오중민, 신현수, 신예슬, and 정형철. "시계열 분석을 활용한 서울시 미세먼지 예측." *Journal of The Korean Data Analysis Society* 19, no. 5 (2017): 2457-68.
- 이동현, 김도관, 박봉철, and 김예슬. *부산 도시대개조를 위한 노후공업지역 특화 관리방안* = [A Study on the Improvement of Decrepit Industrial Areas for Urban Renewal in Busan]. Vol. 2020; 부산 :: 부산연구원, 2020.
- 이만형, 안윤상, and 전병윤. "공업지역 활성화 시범사업에 대한 입주기업 요구사항 분석: 부산 사상공업지역을 중심으로." *한국산학기술학회논문지* 22, no. 6 (2021): 127-39.
- 이소림, 도우곤, 조정구, and 배성근. "부산광역시 온천동지역 대기 중의 중금속 발생특성." *한국대기환경학회 학술대회논문집* (2007): 1747-50.
- 이승원, 손이슬, and 김정권. "부산지역의 미세먼지 중 중금속 및 이온성분과 선박배출가스의 영향에 관한 연구." *한국환경과학회지* 20, no. 1 (2011): 147-53.
- 이평구, 강민주, 염승준, 이인경, 박성원, and 이육중. "부산시 회동저수지 집수분지 내 국도도로변 퇴적물의 미량원소 오염 및 존재형태." *지하수토양환경* 11, no. 5 (2006): 20-34.
- 이한솔. "한국의 겨울철 PM 예측을 위한 간단한 통계적 방법의 개발." 서울대학교 대학원, 2016.
- 전병일. "부산지역 도로변과 주거지역의 PM10과 PM2.5 농도 특성." *한국환경과학회지* 27, no. 7 (2018): 577-86.
- 정기호, 이정미, 홍성란, and 이은화. "울산공업단지 주변 주거지역의 대기 중 Pb, Cd 및 As 분석." *한국환경분석학회지* 제 9, no. 2 (2006): 69-73.

- 정은혜, 백성옥, 조국, and 허중배. "부산지역 대기 중 유해대기오염물질 (중금속, PAH)의 농도 특성 및 오염원 추정." *한국대기환경학회 학술대회 논문집* (2021): 308-08.
- 정중철. "서울시 PM10 공간분포 분석과 시계열 변화." *한국지리정보학회 지* 17, no. 1 (2014): 61-69.
- 정혜령, 최진영, 나공태. "도시지역 도로먼지의 중금속 오염 특성: 토지이용 특성에 따른 비교." *환경분석과 독성보건* 23, no. 2 (2002): 101-11.
- 조경학, 이병영, 권명흠, and 김석철. "심층 신경망을 이용한 대기질 예측." *한국대기환경학회지* 35, no. 2 (2019): 214-25.
- 최배진, and 김기현. "[환경] 대기 분진 중 중금속 성분의 공간적 농도분포 특성 비교: 서울시 7개 관측점을 중심으로." *분석과학* 16, no. 2 (2003): 143-51.
- 최성화, 최성우, 김동영, 차영욱, 박승우, 이서이, and 유은철. "부산 공단 지역 PM-10, PM-2.5 중 유해중금속 농도분포 및 위해성 평가-사상공단을 중심으로." *환경분석과 독성보건* 24, no. 3 (2021): 133-48.
- 최윤나, 전용택, 이치원, 이종대, 장봉기, 양원호, and 손부순. "아산지역의 대기 중 중금속 농도에 관한 연구." *한국대기환경학회 학술대회논문집* (2007) : 275-76.
- Bulín, Martin, Luboš Šmídl, and Jan Švec. "On Using Stateful Lstm Networks for Key-Phrase Detection." 287-98, 2019.
- Carslaw, David C, and Karl Ropkins. "Openair—an R Package for Air Quality Data Analysis." *Environmental Modelling & Software* 27 (2012): 52-61.
- Chen, Xiaochen, Lai Wei, and Jiaxin Xu. "House Price Prediction Using Lstm." *arXiv preprint arXiv:1709.08432* (2017).
- Dai, Qili, Xiaohui Bi, Jian-hui Wu, Yufen Zhang, Jing Wang, Hong Xu, Lin Yao, Li Jiao, and Yinchang Feng. "Characterization and Source Identification of Heavy Metals in Ambient PM10 and PM2.5 in an Integrated Iron and Steel Industry Zone Compared with a Background Site." *Aerosol and Air Quality Research* 15 (2015): 875-87.



- Duan, Jingchun, and Jihua Tan. "Atmospheric Heavy Metals and Arsenic in China: Situation, Sources and Control Policies." *Atmospheric Environment* 74 (2013): 93–101.
- Hsu, Chin–Yu, Hung–Che Chiang, Mu–Jean Chen, Chun–Yu Chuang, Chao–Ming Tsen, Guor–Cheng Fang, Ying–I Tsai, et al. "Ambient PM<sub>2.5</sub> in the Residential Area near Industrial Complexes: Spatiotemporal Variation, Source Apportionment, and Health Impact." *Science of the Total Environment* 590 (2017): 204–14.
- Huang, Xudong, Ilhan Olmez, Namik K Aras, and Glen E Gordon. "Emissions of Trace Elements from Motor Vehicles: Potential Marker Elements and Source Composition Profile." *Atmospheric environment* 28, no. 8 (1994): 1385–91.
- Hyndman, Robin John, and George Athanasopoulos. *Forecasting: Principles and Practice. 2nd ed.*: OTexts, 2018.
- Lee, Seungmin, Chang–Hoi Ho, and Yong–Sang Choi. "High–PM<sub>10</sub> Concentration Episodes in Seoul, Korea: Background Sources and Related Meteorological Conditions." *Atmospheric Environment* 45, no. 39 (2011): 7240–47.
- Li, Huiming, Xin Qian, and Qin' geng Wang. "Heavy Metals in Atmospheric Particulate Matter: A Comprehensive Understanding Is Needed for Monitoring and Risk Mitigation." ACS Publications, 2013.
- Li, Huiming, Meng Yang, Fengying Li, Xuemei Liu, Mengfan Zhou, and Xin Qian. "Heavy Metals in Submicronic Particulate Matter (PM<sub>1</sub>) from a Chinese Metropolitan City Predicted by Machine Learning Models." *Chemosphere* 261 (2020): 127571.
- Liu, Yan, Jian Hu, Xiran Wang, Jing Jia, Jun Li, Lei Wang, Ling Hao, and Peng Gao. "Distribution, Bioaccessibility, and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> During Winter Heating Periods in Five Types of Cities in Northeast China." *Ecotoxicology and Environmental Safety* 214 (2021): 112071.

Maggs, Richard. *A Review of Arsenic in Ambient Air in the UK*. (Executive, Scottish: 2000).

Men, Cong, Ruimin Liu, Qingrui Wang, Lijia Guo, and Zhenyao Shen. "The Impact of Seasonal Varied Human Activity on Characteristics and Sources of Heavy Metals in Metropolitan Road Dusts." *Science of the Total Environment* 637 (2018): 844–54.

Pacyna, Elisabeth G, Jozef M Pacyna, Janina Fudala, Ewa Strzelecka–Jastrzab, Stanislaw Hlawiczka, Damian Panasiuk, Steffen Nitter, et al. "Current and Future Emissions of Selected Heavy Metals to the Atmosphere from Anthropogenic Sources in Europe." *Atmospheric environment* 41, no. 38 (2007): 8557–66.

Sah, Dinesh, Puneet Kumar Verma, Maharaj Kumari Kandikonda, and Anita Lakhani. "Pollution Characteristics, Human Health Risk through Multiple Exposure Pathways, and Source Apportionment of Heavy Metals in PM10 at Indo–Gangetic Site." *Urban Climate* 27 (2019): 149–62.

Shao, Li, Huayun Xiao, and Daishe Wu. "Speciation of Heavy Metals in Airborne Particles, Road Dusts, and Soils Along Expressways in China." *Chinese Journal of Geochemistry* 32, no. 4 (2013): 420–29.

Shin, Ki–Hong. "Dynamical Prediction of Meteorological Factors Using the Long Short–Term Memory Network and the Deep Neural Network on Korean Cities." *부경대학교*, 2021.

Tan, Ji–Hua, Jing–Chun Duan, Yong–Liang Ma, Fu–Mo Yang, Yuan Cheng, Ke–Bin He, Yong–Chang Yu, and Jie–Wen Wang. "Source of Atmospheric Heavy Metals in Winter in Foshan, China." *Science of the total environment* 493 (2014): 262–70.

"Understanding LSTM Networks." github. accessed 20221109, <http://colah.github.io/posts/2015-08-Understanding-LSTMs/>.

Wang, Qiong, Xiao–Hui Bi, Jian–Hui Wu, Yu–Fen Zhang, and Yin–Chang Feng. "Heavy Metals in Urban Ambient PM10 and Soil

Background in Eight Cities around China." *Environmental monitoring and assessment* 185, no. 2 (2013): 1473–82.

Wang, Shengwei, Yulin Zhan, Hao Ji, and Ping Li. "Prediction of Heavy Metal Cd Content in Basin Soil with Time Series Input." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 804, no. 4 (2021/07/01 2021): 042079.

Wu, Xianchu, Bin Chen, Tianxue Wen, Ammara Habib, and Guangyu Shi. "Concentrations and Chemical Compositions of PM10 During Hazy and Non-Hazy Days in Beijing." *Journal of Environmental Sciences* 87 (2020): 1–9.

Xiao, Hui, Xin Qian, Shiyin Li, Yang Liu, Xuemei Liu, and Huiming Li. "Prediction of Heavy Metals in Airborne Fine Particulate Matter Using Magnetic Parameters by Machine Learning from a Metropolitan City in China." *Atmospheric Pollution Research* 13, no. 3 (2022): 101347.

Yadav, Anita, CK Jha, and Aditi Sharan. "Optimizing LSTM for Time Series Prediction in Indian Stock Market." *Procedia Computer Science* 167 (2020): 2091–100.

## 부록

Appendix 1. Number of visitors to Buk-gu and Suyeong-gu provided by the ‘Korea Tourism Data Lab’ .

|      | Buk-gu    |           |           | Suyeong-gu |           |           |
|------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
|      | 2018      | 2019      | 2020      | 2018       | 2019      | 2020      |
| Jan. | 1,463,372 | 1,492,286 | 2,301,754 | 2,604,791  | 2,655,827 | 2,913,129 |
| Feb. | 1,738,862 | 1,655,840 | 1,638,084 | 2,551,017  | 2,705,754 | 2,257,343 |
| Mar. | 1,780,220 | 1,772,305 | 1,573,162 | 2,726,893  | 2,924,618 | 2,162,264 |
| Apr. | 1,623,507 | 1,439,938 | 1,751,516 | 2,696,492  | 2,503,885 | 2,479,715 |
| May. | 1,755,958 | 1,739,261 | 2,107,338 | 3,008,950  | 3,006,736 | 2,971,617 |
| Jun. | 1,584,465 | 1,542,368 | 1,892,480 | 2,872,826  | 2,848,751 | 2,775,141 |
| Jul. | 1,590,760 | 1,726,858 | 1,971,522 | 3,222,722  | 3,103,093 | 3,012,972 |
| Aug. | 1,645,101 | 1,765,908 | 1,946,880 | 3,240,766  | 3,314,560 | 3,059,529 |
| Sep. | 1,799,688 | 2,112,662 | 1,865,381 | 3,086,414  | 2,806,330 | 2,587,993 |
| Oct. | 1,536,414 | 2,007,491 | 1,969,879 | 2,921,555  | 2,840,517 | 2,909,905 |
| Nov. | 1,486,802 | 2,080,027 | 1,907,885 | 2,669,888  | 2,898,752 | 2,614,255 |
| Dec. | 1,607,239 | 2,202,010 | 1,634,673 | 2,887,729  | 3,039,452 | 2,134,388 |

Appendix 2. Traffic data near the measuring site provided by ‘Busan Metropolitan City vehicle traffic survey details service report’ from 2014 to 2020.

| Measuring site | No. | Site name                              | 2016    | 2017    | 2018    | 2019    | 2020    |
|----------------|-----|--|---------|---------|---------|---------|---------|
| Gwangan-dong   | 19  | Centum North Avenue<br>(Jwasuyeonggyo) | 27,606  | 29,148  | 28,543  | 28,881  | 29,154  |
|                | 21  | Gwangnam-ro                            | 30,526  | 31,404  | 29,923  | 31,656  | 31,289  |
|                | 22  | Centum-city Intersection               | 105,104 | 105,145 | 98,852  | 97,106  | 97,632  |
|                | 53  | Suyeong Intersection                   | 74,345  | 74,927  | 70,995  | 71,061  | 71,646  |
|                | 54  | Deanam Intersection                    | 149,118 | 148,339 | 144,611 | 142,605 | 143,692 |
| Deokcheon-dong | 31  | Deokcheon Intersection                 | 68,156  | 61,828  | 58,395  | 58,726  | 56,218  |
|                | 78  | Gumandeok-ro<br>(Mandeok Tunnel No.1)  | 24,857  | 24,700  | 21,294  | 22,126  | 21,863  |
|                | 79  | Mandeok-daero<br>(Mandeok Tunnel No.2) | 83,381  | 82,115  | 77,456  | 76,594  | 74,972  |
| Yeonsan-dong   | 1   | Yeonsan Intersection                   | 102,555 | 100,223 | 100,611 | 93,331  | 83,881  |
|                | 2   | Hamajeong Intersection                 |         | 105,791 | 106,696 | 103,112 | 99,591  |

|              |     |  |         |         |         |         |         |
|--------------|-----|--|---------|---------|---------|---------|---------|
|              | 3   | Songgongsamgeori                                     | 109,580 | 104,762 | 105,435 | 87,748  | 80,580  |
|              | 100 | Sin-risamgeori                                       |         | 65,044  | 64,089  | 61,369  | 60,511  |
| Hakjang-dong | 32  | Namhae Branch Expressway<br>(Seobusannakdongganggyo) | 118,489 | 119,069 | 120,276 | 114,216 | 116,053 |
|              | 33  | Nakdong-daero<br>(Next to Gamcheon Intersection)     | 72,491  | 70,818  | 70,029  | 68,157  | 66,239  |
|              | 34  | Gangbyeon-daero<br>(Next to Gamcheon Intersection)   | 93,233  | 90,616  | 91,334  | 90,403  | 92,217  |
|              | 35  | Jurye Intersection                                   | 95,807  | 91,735  | 89,654  | 85,662  | 85,696  |