

경상북도 초미세먼지 발생 기여도 평가

이수진 · 송정한 · 박동규 · 이병근 · 김지훈 · 손정우 · 윤찬수 · 안상영

대기보전과

Analysis of Air pollutants Contribution in Gyeongsangbuk-do

S. J. Lee, J. H. Song, D. G. Park, B. K. Lee, J. H. Kim, J. W. Son, C. S. Yoon and S. Y. Ahn

Air Quality Conservation Division

Abstract

Despite the absence of a large-scale industrial complex, the fine particle concentration of Yeongju has been reported to be higher than other industrial cities in Gyeongsangbuk-do. In this study, the concentrations of PM-10, PM-2.5 and their water-soluble ionic compounds were measured from August to November, 2020 in Yeongju and Yeongcheon to identify the characteristics of high concentration of fine particle in Yeongju. In summer, the fine dust concentration in Yeongcheon was higher, while in autumn, the fine dust concentration in Yeongju was higher. In the case of Yeongju, the contribution of NO_3^- during the fall season that fossil fuel use increased has definitely increased. These results indicate that the secondary aerosol formation as well as the regional and/or the long-range transport might have effected on enhancing fine particle concentration in Yeongju during the autumn and winter months.

Keywords : *PM10, PM2.5, Air pollutants, Water-soluble ions*

1. 서론

경상북도 북부, 소백산 자락에 위치한 영주시는 대규모 공단 등 오염유발 시설이 적어 청정지역으로 알려져 있지만, 도내 다른 지역에 비하여 미세먼지 농도가 높게 측정되고 있다. 2019년 영주시의 PM-10, PM-2.5 평균 농도는 각각 $58\mu\text{g}/\text{m}^3$, $25\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 산업도시인 포항($38\mu\text{g}/\text{m}^3$, $19\mu\text{g}/\text{m}^3$), 구미($48\mu\text{g}/\text{m}^3$, $20\mu\text{g}/\text{m}^3$)의 미세먼지 농도에 비하여 높은 수치이다. 영주시의 미세먼지는 대도시나 주요 산업도시와는 다른 특성을 가지며, 고농도 현상의 원인도 다를 것으로 추정된다. 본 연구는 영주지역 대기 중 PM-10, PM-2.5의 물리화학적 특성을 파악하여 영주시가 타 시·군 보다 높은 미세먼지 농도가 나타나는 이유를 밝히고자 한다. 특히, 미세먼지 주요 구성 성분의 30-50%를 차지하는 이온성분 분석을 통하여 기상요인 등 영주지역의 지역적 특이성과 함께 고농도 원인을 분석하고자 한다¹⁾.

2. 연구방법

2.1 시료채취

본 연구에서는 영주지역 미세먼지의 계절적, 지역적 특성을 파악하기 위하여 영주시와 인구수, 지형 등이 유사한 영천시를 비교군으로 선정하여 시료를 채취하였다. 영주시 가흥동 측정소, 영천시 영천시 측정소에서 각각 2020년 8월부터 10월까지 매월 10~13일간(8월 2일~11일, 9월 5일~17일, 10월 6일~15일, 11월 10일~19일) 24시간 간격으로 총 148개의 시료를 채취하였다. 11월은 고농도 사례 분석을 위하여 추가적으로 PM-10만 채취하였으며, 대기 중 미세먼지

시료는 중량포집기(BAM1020, Metone)를 사용하여 16.7LPM으로 채취하였다.

2.2 시료분석

시료가 채취된 여지는 24시간 동안 데시케이터에서 항량 시킨 후 0.1mg까지 평량하여 중량 농도를 산출하였다. 중량 농도를 측정할 여지는 밀봉 후 이온성분 분석 전까지 냉동보관 하였다. 여지는 이온성분 분석을 위하여 증류수 25mL로 4시간 동안 초음파 추출을 한 후 회전식 진탕기(RS-1, 제이오텍)를 사용하여 20min 동안 250rpm으로 흔들여 주었고, $0.45\mu\text{m}$ 실린지 필터로 여과하였다. 여과된 시료는 이온크로마토그래피(ICS-5000, Dionex)를 이용하여 음이온(SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^-), 양이온(NH_4^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+})를 분석하였으며, 상세한 분석 조건은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Analytical conditions of ion chromatography.

	Cations	Anions
Instrument	ICS-5000(Dionex)	ICS-5000(Dionex)
Column	Ionpac CS12A	Ionpac AS19
Detector	Conductivity detector	Conductivity detector
Suppressor	CDRS 600	ADRS 600
Eluent	15mM MSA	20mM KOH
Flow rate	1mL/min	1mL/min
Injection vol.	100 μl	25 μl

2.3 대기오염물질 및 기상자료

기체상대기오염물질 SO_2 , CO , NO_2 의 농도는 도내의 대기오염측정망의 자료이며, 온도, 상대습도 및 풍향과 같은 기상자료는 기상청 기상자료 개방포털의 자료를 사용하였다. 종관 기상 특성과 Kim et al.(2020) 등에서 제시한 바를 토대로 8~9월은 여름, 10~11월은 가을로 구분하였다²⁾.

3. 결과 및 고찰

3.1 중량농도 및 이온성분 분석 특성

Table 2와 3은 각각 PM-2.5와 PM-10의 중량농도 및 이온성분 분석 자료를 월별로 정리하여 나타낸 것이다. 또한, Fig. 1에 PM-2.5의 농도(a) 및 이온성분의 구성 비율(b)을 Fig. 2에 PM-10의 전체성분의 구성 비율(a) 및 이온성분의 구성 비율(b)을 월별로 나타내었다. 이때 11월의 경우 외부유입, 대기정체 등의 영향으로 전국적으로 미세먼지 고농도 현상을 보인 11/12~13, 16~17의 데이터는 ‘고농도’로 이를 제외한 데이터는 ‘고농도 제외’로 나타내었다.

3.1.1 PM-2.5

여름철(8~9월) 영주시의 PM-2.5의 중량농도가 각각 $9.40 \pm 4.08 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $16.03 \pm 6.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 영천시의 중량농도 $14.88 \pm 9.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $19.48 \pm 8.29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 비하여 낮은 반면에, 가을철(10월)은 영주

시의 중량농도가 $19.09 \pm 5.94 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 영천시의 중량농도 $16.99 \pm 3.77 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 높았다. 공통적으로 SO_4^{2-} 는 여름철(8~9월)에 농도가 높았으며, 가을철(10월)에 농도가 낮았다. 황산염은 일반적으로 고온에서 활발한 광화학 산화 반응에 의해 여름철 농도가 증가한다. 반면에, NO_3^- 는 가을철(10월)에 농도가 높았으며, 이는 질산암모늄(NH_4NO_3)의 해리상수가 대기 온도에 크게 의존하기 때문에 고온에서 질산암모늄(NH_4NO_3)의 결합이 저해되기 때문이다³⁾. 또한, 겨울철 화석 연료 연소과정을 통해 전구물질인 질소산화물의 배출이 증가하기 때문에 질산염은 대체로 겨울철 농도가 증가한다. NH_4^+ 는 SO_4^{2-} 와 NO_3^- 의 고농도가 다른 계절에 나타나기 때문에 계절 특성이 분명하지 않았다. 특징적으로 영천시는 8월 SO_4^{2-} 농도가 $6.80 \pm 6.26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 전체 구성 성분의 38%를 차지할 만큼 높은 농도를 보였으며, 영주시의 10월 NO_3^- 농도는 $1.26 \pm 1.43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 급격하게 증가하여 영천시 NO_3^- 농도 $0.58 \pm 0.79 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 2배 이상으로 나타났다.

Table 2. A summary of average PM-2.5 and its ion species concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

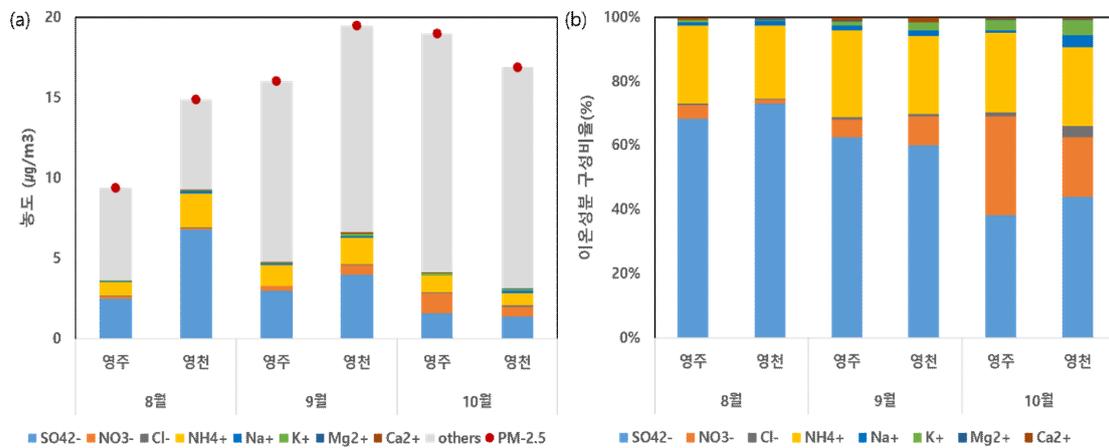
월	지역	중량농도	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-	NH_4^+	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
8월	영주	9.40 ± 4.08	2.49 ± 2.27	0.16 ± 0.15	0.02 ± 0.01	0.89 ± 0.64	0.04 ± 0.03	0.02 ± 0.01	0.01 ± 0.00	0.03 ± 0.03
	영천	14.88 ± 9.21	6.80 ± 6.26	0.11 ± 0.06	0.02 ± 0.02	2.12 ± 1.86	0.15 ± 0.07	0.03 ± 0.02	0.03 ± 0.06	0.04 ± 0.03
9월	영주	16.03 ± 6.18	3.00 ± 1.41	0.27 ± 0.29	0.03 ± 0.04	1.30 ± 0.49	0.06 ± 0.04	0.07 ± 0.03	0.01 ± 0.01	0.05 ± 0.06
	영천	19.48 ± 8.29	4.00 ± 2.79	0.59 ± 0.69	0.05 ± 0.06	1.62 ± 0.95	0.11 ± 0.06	0.17 ± 0.10	0.01 ± 0.01	0.10 ± 0.17
10월	영주	19.09 ± 5.94	1.58 ± 0.93	1.26 ± 1.43	0.05 ± 0.08	1.03 ± 0.62	0.02 ± 0.04	0.14 ± 0.07	0.01 ± 0.00	0.03 ± 0.03
	영천	16.99 ± 3.77	1.38 ± 0.70	0.58 ± 0.79	0.11 ± 0.08	0.77 ± 0.35	0.12 ± 0.09	0.14 ± 0.06	0.01 ± 0.01	0.02 ± 0.03

I. 연구사업

Table 3. A summary of average PM-10 and its ion species concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

월	지역	중량 농도	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
8월	영주	22.34 ±6.68	2.79± 2.55	0.36± 0.22	0.12± 0.08	0.89± 0.67	0.19± 0.14	0.14± 0.04	0.03± 0.02	0.11± 0.08
	영천	24.16± 11.02	7.05± 6.39	0.48± 0.33	0.17± 0.19	2.13± 1.90	0.58± 0.29	0.07± 0.03	0.06± 0.03	0.13± 0.06
9월	영주	27.53 ±4.35	3.25± 1.54	0.71± 0.46	0.05± 0.04	1.31± 0.49	0.18± 0.17	0.15± 0.03	0.04± 0.02	0.21± 0.10
	영천	29.63± 10.73	4.45± 2.91	1.43± 1.08	0.18± 0.27	1.69± 0.96	0.34± 0.25	0.24± 0.12	0.06± 0.03	0.23± 0.10
10월	영주	29.31 ±9.46	1.87± 1.07	2.09± 1.89	0.30± 0.21	1.11± 0.68	0.30± 0.21	0.21± 0.09	0.05± 0.02	0.30± 0.11
	영천	28.48 ±6.77	1.80± 0.82	1.80± 1.35	1.15± 1.05	0.87± 0.45	0.95± 0.73	0.22± 0.07	0.11± 0.05	0.29± 0.16
11월 (고농도)	영주	64.74 ±8.35	6.11± 3.32	12.14 ±3.20	0.66± 0.41	4.96± 1.52	0.31± 0.27	0.77± 0.25	0.07± 0.03	0.52± 0.11
	영천	63.89 ±8.37	5.92± 3.29	10.08 ±2.81	0.81± 0.38	4.38± 1.16	0.38± 0.28	0.60± 0.11	0.10± 0.04	0.62± 0.17
11월 (고농도 제외)	영주	40.11± 10.43	3.53± 2.23	5.58± 2.23	0.66± 0.45	2.68± 1.18	0.36± 0.26	0.36± 0.14	0.05± 0.02	0.35± 0.11
	영천	39.21± 12.37	2.93± 1.92	3.99± 1.79	0.51± 0.25	1.83± 0.72	0.59± 0.35	0.39± 0.17	0.09± 0.04	0.31± 0.16

Fig. 1. Monthly variations of PM-2.5 and ions (a) concentrations and (b) relative ratios of each species include only measured value.



3.1.2 PM-10

PM-10의 경우 PM-2.5와 마찬가지로 여름철(8~9월)에는 영천시의 농도가 가을철(10~11월)에는 영주시의 농도가 높았다. 그리고 영천시의 경우 10월 해염이온인 Na^+ 와 Cl^- 의 농도가 각각 $0.95 \pm 0.73 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1.15 \pm 1.05 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 두 성분의 합이 전체 성분의 7%를 차지하며, 농도의 증가가 두드러진다. 전체 구성성분의 비율을 보면 영주시의 경우 8월에서 11월(고농도 제외)로 갈수록 이온성분이 차지하는 비율이 18%에서 32%로 점차 증가하지만, 영천시의 경우 37%에서 26%로 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 반면에, 11월 고농도 시기에는 이온성분이 차지하는 비율이 영주시 38%, 영천시 35%로 비슷하며 구성성분간의 비율 또한 두 지역이 유사함을 확인하였다.

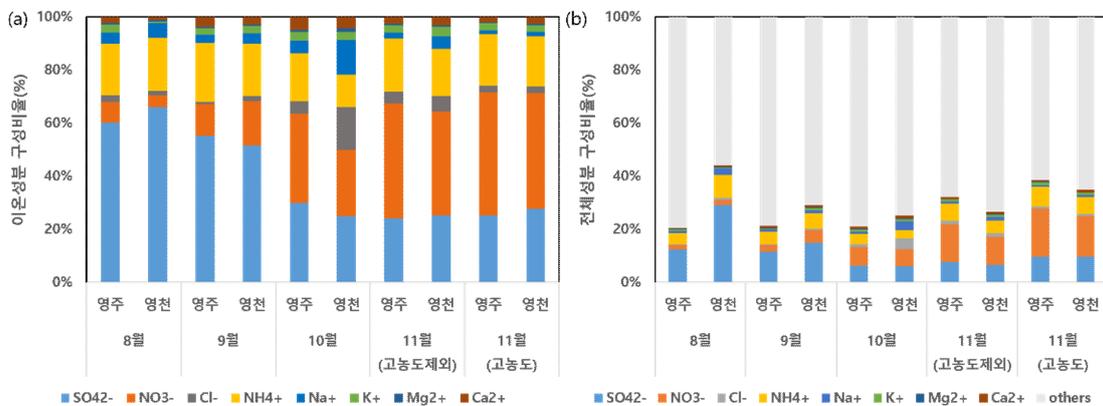
또한, 10월에 비하여 SO_4^{2-} , NO_3^- 이온 성분의 증가 폭이 고농도 제외 시기에는 영주시의 농도가 각각 1.9배, 2.7배 증가하여 영천시 농도 증

가 폭인 1.6배, 2.2배 보다 높았다. 고농도 시기에는 영주시의 농도가 각각 3.3배, 5.8배, 영천시의 농도는 3.3배, 5.6배 증가하여 증가폭 역시 유사함을 확인하였다.

3.2 지역별 미세먼지 특성 차이 원인분석

미세먼지의 생성 및 주요 화학적 성분 농도는 국지적 오염원 및 광역적 오염원의 영향을 받는다⁴⁾. 3.1절에서 확인된 지역별 미세먼지의 화학적 특성의 차이를 규명하기 위하여 기체상 전구물질의 농도(SO_2 , NO_2 , CO), 기상조건(온도, 습도, 풍향) 등을 분석하였다. Table 4는 영주시와 영천시 두 지역의 평균기온, 상대습도, 주풍향을 월별로 정리한 표이다. Fig. 3은 영주시와 경상북도의 월별 가스상 오염물질((a) SO_2 , (b) CO , (c) NO_2)의 평균 농도를 2017~2020년까지 연도 별로 나타낸 것이며, Fig. 4는 영주시 대기오염물질의 연평균 농도를 2017년 농도를 기준으로 나타낸 그림이다.

Fig. 2. Relative ratios of each species in PM-10 (a) ions include only measured value and (b) PM-10 component include unidentified value.



I . 연구사업

Table 4. A summary of monthly average values of meteorological parameters.

구분	8월		9월		10월		11월	
	영주	영천	영주	영천	영주	영천	영주	영천
기온(°C)	21.43±1.03	24.23±1.84	18.20±0.65	19.17±1.19	11.70±1.40	13.83±1.99	8.99±3.43	10.12±4.14
상대습도 (%)	87.22±2.47	75.51±9.05	79.08±5.33	79.66±5.02	66.49±5.67	62.09±6.71	67.19±13.69	65.77±8.94
풍속 (m/s)	0.95±0.52	1.43±0.68	1.19±0.44	1.05±0.35	1.71±0.48	1.77±1.11	1.78±0.81	0.99±0.60
주풍향	남동, 서북서, 북서	서남서, 동북동, 동	서북서, 북서	동, 서북서	북서, 서북서	동, 동북동	북서, 서북서	동, 서남서

3.2.1 국지적 기상 요인의 영향

영주시와 영천시는 각각 경상북도의 북부지역과 남부지역에 위치하며, 평균 기온은 영천시가 전체적으로 높았다. 앞서 8월 영천시 PM-2.5의 SO_4^{2-} 농도가 영주시에 비하여 높았던 것은 영천시 8월 기온이 영주시에 비하여 3°C 가량 높았으며, 고온으로 인한 활발한 광화학 산화 반응 때문인 것으로 판단된다. 또한 8월 영주시의 상대습도는 87%로 영천시의 75%에 비하여 높은 수준으로, 시료채취 기간 10일 내내 내린 강우에 의한 영향으로 영천시에 비하여 영주시의 미세먼지 농도가 낮았던 것으로 보여 진다. 그리고 영천시의 10월 주풍향이 동풍으로, PM-10에서 Na^+ , Cl^- 이온의 증가로 확인 할 수 있듯이 동해안 유입의 영향을 받은 것으로 보여 진다. 영주시의 경우 10월, 11월 주풍향은 북서풍으로 외부오염물질의 유입이 용이할 것으로 예상된다.

3.2.2 기체상 오염물질 농도 영향

SO_2 와 CO는 화석연료의 연소 과정에서 발생하는 대기오염물질로 미세먼지 생성 시 전구물질로 작용한다. 영주시의 경우 가을·겨울철 SO_2 및 CO의 농도가 경북 평균에 비하여 상당히 높으며, 18년 이후부터는 경북 평균 농도와 영주시 평균 농도의 농도차가 점차 감소하고 있음을 확인 할 수 있다. 영주시의 도시대기오염물질 분석 결과를 보면 PM-10은 전국적으로 고농도 미세먼지 현상이 이슈가 되었던 19년에 최고 농도를 보였으며, 코로나-19 등의 영향으로 전국적으로 미세먼지 농도가 감소한 20년에는 감소하였다. 반면에 PM-2.5의 경우 18년 이후 가스상 오염물질의 농도가 감소하였으며, 가스상 오염물질의 농도 감소가 PM-2.5의 2차 생성의 감소로 이어져 19년부터 농도가 감소함을 확인할 수 있다. 따라서 가을·겨울철 화석연료 사용으로 인한 활발한 2차 에어로졸의 생성이 영주시 고농도 미세먼지 현상에 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 3. Monthly variations of air pollutants in Yeongju and Gyeongsangbuk-do during 2017~2020; (a)SO₂, (b)CO, (c)NO₂.

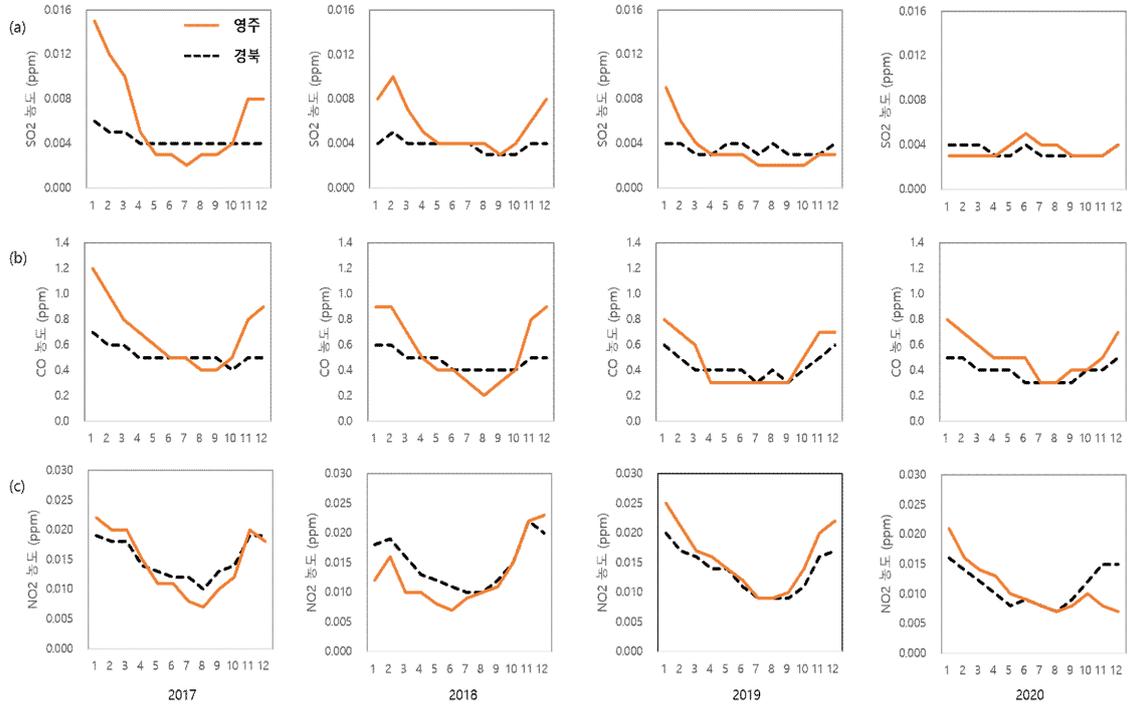
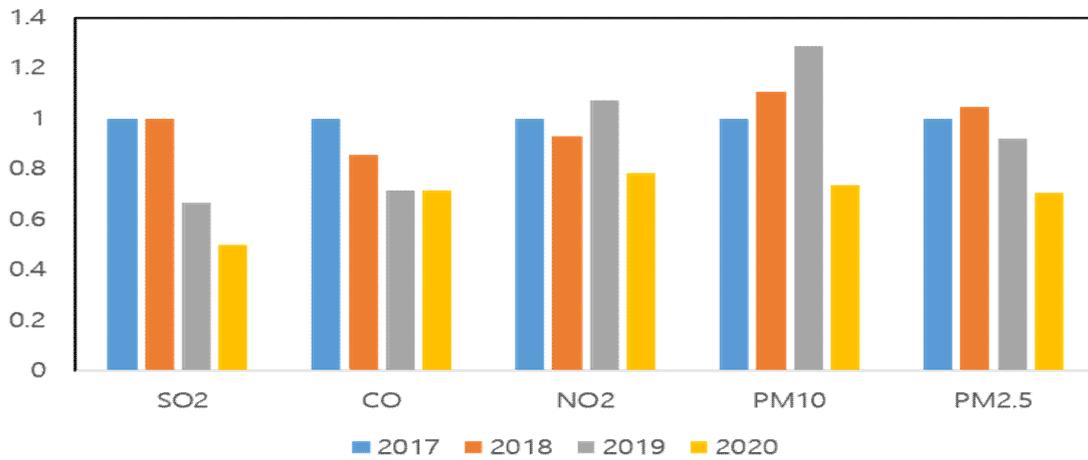


Fig. 4. Annual concentration of air pollutants in Yeongju based on the concentration in 2017.



4. 결론

본 연구는 영주지역 미세먼지의 물리화학적 특성을 파악하고 고농도 현상의 원인을 밝히고자, 영천시를 비교군으로 하여 4개월 동안 미세먼지를 채취하고 중량농도와 이온성분을 분석하였다. PM-2.5와 PM-10 공통적으로 여름철(8~9월)에는 영천시의 미세먼지 농도가 가을철(10~11월)에는 영주시의 미세먼지 농도가 높았다. 영천시의 경우 8월 SO_4^{2-} 이온이 PM-2.5의 38%를 차지 할 만큼 높은 농도를 보였다. 여름철 영천시의 높은 기온에 의한 활발한 광화학 반응으로 2차 에어로졸의 생성이 미세먼지 농도를 높이는데 일조하였을 것으로 추정된다. 영주시의 경우 10월 NO_3^- 이온이 급격하게 증가함을 확인하였으며, 외부유입 및 화석연료 사용으로 인한 2차 생성 등의 복합적인 영향으로, 고농도가 나타나는 원인은 몇 가지로 분리하기 어렵다. 향후 장기적으로 이온성분 뿐만 아니라 미확인된 성분의 분석을 통하여 영주시의 주요 배출원 및 생성원의 정량적 기여도 파악이 필요할 것으로 판단된다.

3. 조성환, 김평래, 한영지, 김현웅, 이승목, “강원도 춘천에서 측정된 PM-2.5의 탄소 및 이온 성분 농도 특성 및 고농도 사례 분석”, 한국대기환경학회지, **32(4)**, 435~447, (2016).
4. 유근혜, 박승식, 김영성, 신혜정, 임철수, 반수진, 유정아, 강현정, 서영교, 강경식, 조미라, 정선아, 이민희, 황태경, 강병철, 김효선, “대기오염집중측정소별 2013~2015년 사이의 PM-2.5 화학적 특성 차이 및 유발인자 조사”, 한국대기환경학회지, **34(1)**, 16~37(2018).

참고문헌

1. 이경민, 김신도, 김동술, “서울지역 미세먼지 중 이온성분의 존재형태 추정”, 대한환경공학회지, **37(4)**, 197~203(2015).
2. 김주애, 임세희, Xiaona Shang, 이미혜, 강경식, 김영성, “2013~2016년 제주 PM-2.5 화학 조성 변화 및 고농도 발생 특성”, 한국대기환경학회지, **36(3)**, 388~403(2020).