

산불이 영동지역 미세먼지 농도에 미치는 영향

안성기* · 최광희**

Effect of Forest Fire on Fine Particulate Matter Concentration in Coastal Cities of Gangwon-do, South Korea

Seong Gi An* · Kwang Hee Choi**

요약 : 봄철 미세먼지는 우리나라 전역에 영향을 준다. 하지만, 미세먼지에 관한 연구는 인구가 많은 수도권과 대도시에 편중되어 있다. 본 연구는 봄철 대형 산불이 자주 발생하는 영동지역을 중심으로 산불과 미세먼지 농도의 관계를 규명하고자 하였다. 강원 영동지역 미세먼지는 수도권 및 영서지역의 미세먼지 변화와 패턴이 유사하지만, 농도 수준은 상대적으로 낮은 것으로 알려져 있다. 특히, 봄철 미세먼지의 양상은 상당히 다른 편이다. 본 연구에서는 강원도 고성, 속초, 양양, 강릉, 동해, 삼척 등 6개 시군을 대상으로 2015년부터 2019년까지 5년간 산불 발생일을 중심으로 산불과 대기질 항목 간의 상관성을 분석하였다. 연구 결과, 산불이 발생하면 미세먼지 농도가 크게 증가하는 것으로 나타났다. 산불 직전 미세먼지(PM₁₀) 농도는 평균 48.47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으나, 산불 발생 기간에는 76.13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 상승하였다. 같은 시기에 초미세먼지(PM_{2.5})도 산불 직전 23.86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 31.38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 증가하였다. 또한, 산불강도가 클수록 PM₁₀ 농도가 더 높아지는 것으로 나타났다. 산불은 미세먼지 농도 외에 SO₂나 O₃ 등의 대기질 수치도 증가시켰다. 이러한 결과는 산불 발생이 영동지역의 미세먼지 농도 및 대기질에 영향을 주고 있음을 시사한다.
주요어 : 미세먼지, 산불, 대기질, t-검정, 상관분석

Abstract : Fine particulate matter (PM) affects all of South Korea in spring. However, research on PM is mainly concentrated in the capital region or big cities with large population. This study aimed to investigate the relationship between forest fires and PM concentration in the Yeongdong area. Temporal distribution of PM₁₀ in the Yeongdong region of Gangwon-do has a similar pattern to the change in PM₁₀ in the metropolitan area and Yeongseo region, but the concentration level is relatively low. In particular, the pattern in spring, when forest fires are frequent, is quite different. The correlation between forest fires and air quality was analyzed for five years from 2015 to 2019, along the six coastal cities including Goseong, Sokcho, Yangyang, Gangneung, Donghae, and Samcheok. It was found that the concentration of PM is greatly affected by forest fires. Before the outbreak of the fire, PM₁₀ was an average of 48.47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, but during the period of the fire it rose to 76.13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. PM_{2.5} also increased from 23.86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ to 31.38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. In addition, PM₁₀ concentration was proportional to forest fire intensity. SO₂ and O₃ concentrations were also increased by the fire. These results suggest that the occurrence of forest fires is affecting the fine particulate matter and air quality in Yeongdong region.

Key Words : Fine particulate matter, Forest fire, Air quality, t-test, Correlation analysis

*가톨릭관동대학교 지리교육과 석사과정(Master Student, Department of Geography Education, Catholic Kwandong University, daeangeo@cku.ac.kr)

**가톨릭관동대학교 지리교육과 조교수(Assistant Professor, Department of Geography Education, Catholic Kwandong University, geoist@cku.ac.kr)

I. 서론

매년 겨울과 봄, 우리 생활에 밀접한 기상 이슈 중 하나는 ‘미세먼지’이다. 미세먼지는 일반적으로 지름이 10 μm 보다 작은 입자를 말하며, 그 중 지름이 2.5 μm 보다 작은 입자는 초미세먼지(PM_{2.5})로 구분한다. 미세먼지 대응방안은 정부의 대기질 정책을 좌우할 정도로 대단히 중요하다. 미세먼지에 노출되면, 호흡기 질환 증가, 폐 기능 감소, 천식, 폐암 등 여러 가지 건강 문제가 발생할 수 있으며, 특히 초미세먼지에 장기간 노출되면, 호흡기 질환과 심장순환계에 영향을 미쳐 기대 수명을 감소시키는 요인이 된다(양원호, 2019). 언제부터인가 ‘오늘의 날씨’에서 기온보다 미세먼지 농도가 더 큰 관심사가 되었다.

서울에서 출퇴근 시간에 미세먼지가 급증하는 것은 차량운행의 영향으로 추정된다(정권 등, 2007). 대구의 미세먼지는 공업지역에서 가장 농도가 높다(주재희·황인조, 2011). 부산의 미세먼지는 21일 또는 3-4년 주기로 농도가 변화하는 것으로 알려져 있다(손혜영·김철희, 2009). 청주시의 경우, 도로 이동 오염원(23.3%), 비도로 이동 오염원(9.4%), 생물성 연소(8.7%), 제조업 연소(6.3%), 폐기물 중간처리(4.9%)가 미세먼지의 발생원으로 보고되었다(김종연 등, 2019). 이렇듯, 미세먼지에 관한 주요 연구들은 수도권이나 인구가 많은 대도시를 위주로 수행되었다. 대조적으로 지방의 중소도시나 인구가 적은 지역에서는 연구사례가 드물다.

미세먼지의 발생 원인은 다양하다. 미세먼지는 대표적인 장거리 이동 물질이며, 우리나라에 영향을 주는 발생원은 국내와 국외로 나눌 수 있다. 수도권의 경우, 지난 수십 년간 서울-인천을 중심으로 한 연담도시의 확대 과정에서 많은 녹지가 파괴되었다(박샘·최광용, 2016). 그 결과, 국내에서 발생하는 자생적 미세먼지 비율이 높다는 보고도 있다(황승연 등, 2019). 하지만, 국내 미세먼지 농도는 중국 미세먼지 농도와 상관성이 크다(박순애·신현재, 2017; 김기환·김오석, 2019). 중국에서 발생한 미세먼지가 서쪽으로 이동하며 국내의 미세먼지에 기여한다(이현주 등, 2018). 미세먼지는 주로 유기물질, SO₄, 토양성분, NO₃ 등으로 구성된다(김신도·김창환, 2008). 겨울철 발생하는 고농도 미세먼지에는 황산수소암모늄, 질산암모늄, 유기탄소의 농도가 높다(박승명 등, 2012). 초미세먼지의 국내 부문별 발생비율은 산업 분야(42.1%)와 생활 분야(29.3%)가 대부분을 차지한다(미세

먼지특별대책위원회, 2019).

강원도의 경우 미세먼지나 초미세먼지의 분포 패턴에서 영동과 영서가 다르게 나타난다. 영서지역 초미세먼지는 중국과 우리나라 서부 지역과의 상관성이 높지만, 영동지역은 상대적으로 그 영향이 적고 겨울철과 봄철에 일관되게 높다(차승환 등, 2020). 이 기간은 대규모 산불이 자주 발생하는 기간이다. 따라서 산불에 의한 미세먼지 농도 상승을 짐작할 수 있으나, 이에 관한 국내 연구 사례는 거의 없다.

산불에 의한 미세먼지 증가 사례는 2019-2020년 호주 남동부 산불과 2017-2018년 미국 서부 산불이 대표적이다. 호주 산불은 2019년 9월 호주 퀸즈랜드와 뉴사우스 웨일스에서 발생한 산불로 한 때 PM_{2.5}의 농도가 98.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 증가하였는데, 이는 과거 평균농도(6.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)의 14배에 해당한다(Arriagada *et al.*, 2020). 2017~2018년 미국 서부 전역에서 일별 PM_{2.5} 농도가 미국 기준치(35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)를 초과하였는데, 발생한 미세먼지의 90%가 여름철 산불에 의한 것으로 추정되었다(Xie *et al.*, 2020). 한편, 그리스 산불 다발지역인 아테네 북동부에 대한 시뮬레이션 결과, 산불 발생 시 미세먼지가 30% 증가하는 것으로 나타났다(Lazaridis *et al.*, 2008).

지난 17년간 전국에서 발생한 산불의 수는 7,512건이며, 산불 빈도가 가장 높은 지역은 경북이었다(그림 1(a)). 반면 산불 피해 규모의 경우, 강원도 영동지역이 47%로 1위, 경북이 22%로 2위, 경남이 5%로 3위로 나타난다(그림 1(b)). 영동지역의 2015~2019년 5년간 산불 발생 건수는 110건으로 전국 발생 건수의 3%에 불과하나, 피해 면적은 4539.71 ha로 전국 피해면적의 47%를 차지할 정도로 영동지역에서는 대형산불의 비중이 높다(산림청, 2020). 산불의 규모가 커질 경우 국가 차원의 재난으로 확대될 가능성이 높으며(윤혜연·장동호, 2021), 대형산불은 미국이나 호주의 사례에서처럼 미세먼지 배출 가능성이 크다.

영동지방의 대규모 산불은 양간지풍으로 대변되는 강풍과 연관되어 있다. 양간지풍은 양양-고성 구역에 해당하는 산간 및 해안지역의 서풍 계열 바람으로, 실제 기후학적으로 존재하는 국지풍이다(최광용, 2020). 1996년 고성 산불, 2000년 동해안 산불, 2005년 양양 낙산사 산불 등이 이러한 강풍과 관련이 깊다(이명보, 2006). 강릉의 경우, 대형 산불이 발생했던 2017년 5월 6일 일평균 미세먼지가 299 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 기록되었다. 이는 전날의 일

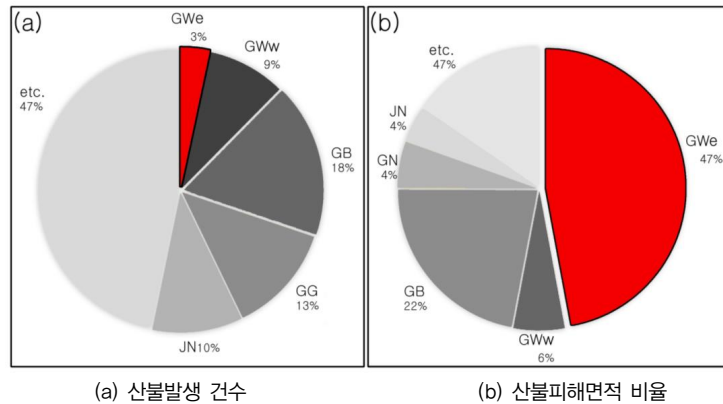


그림 1. 전국 산불발생 현황(2003-2019)

* GWe: 강원영동지역 GWw: 강원영서지역, GB: 경북, GG: 경기, GN: 경남, JN: 전남.

평균 미세먼지보다 약 5배 높은 수치이다. 하지만 아직 까지 산불과 미세먼지에 대한 관계는 분명하지 않다. 따라서, 본 연구는 영동지역의 산불과 미세먼지 발생 간의 상관성을 규명하고자 하였다. 이를 위해, 영동지역 산불 발생 자료와 미세먼지 등 대기질 자료를 수집하고 이들의 관계에 대해 분석하였다.

II. 재료 및 방법

1. 산불 자료

산림청은 홈페이지를 통해 산불피해대장이라는 자료를 제공한다(산림청, 2020). 본 연구는 이 자료에서 영동 지역에 해당하는 강원도 고성, 속초, 양양, 강릉, 동해, 삼척 등 6개 시군의 2015~2019년 산불기록을 추출하여

사용하였다(표 1). 여기에서, 산불수집기간을 지난 5년으로 한정된 이유는 영동지역 대기질 측정이 최근 5년에 국한되었기 때문이다.

지난 5년간 영동지역 6개 시군에서 발생한 산불은 모두 107건이었으며, 피해면적은 3,537.3ha였다. 이 중 발생 건수가 가장 많았던 곳은 강릉(44건)이었으며, 삼척(23건), 고성(20건)이 뒤를 이었다. 산불로 인해 강릉은 1,681.0ha가 소실된 반면, 속초는 1.3ha의 피해를 입었다. 평균피해면적은 삼척(47.5ha/건), 강릉(38.2ha/건), 고성(31.4ha/건) 순으로 나타났다.

2. 대기질 자료

미세먼지(PM10, PM2.5)는 대기질을 나타내는 주요 항목 중 하나이다. 대기측정망 중 가장 많은 측정소가 설치된 도시대기측정망은 SO₂, CO, O₃, NO₂, PM₁₀, PM_{2.5}

표 1. 지난 5년간(2015-2019) 영동지역 주요도시의 산불 발생 및 피해면적

지역	도시 현황		산불		피해면적		평균피해면적* (ha/건)
	면적(km ²)	인구(명)	발생건수	비율(%)	면적(ha)	비율(%)	
고성군	664.55	26,757	20	18.69	628.1	35.88	31.41
속초시	105.76	82,665	2	1.89	1.3	0.03	0.65
양양군	630.09	27,946	14	13.08	132.1	2.91	9.44
강릉시	1040.79	213,321	44	41.12	1681.0	37.05	38.21
동해시	180.20	90,593	4	3.74	2.7	0.06	0.68
삼척시	1187.16	65,243	23	21.50	1092.1	24.07	47.48
계	3808.55	506,525	107	100.00	3537.3	100.00	35.37

* 평균피해면적은 전체 피해면적을 발생건수로 나눈 것으로, Rodríguez *et al.*(2017)이 제시함.

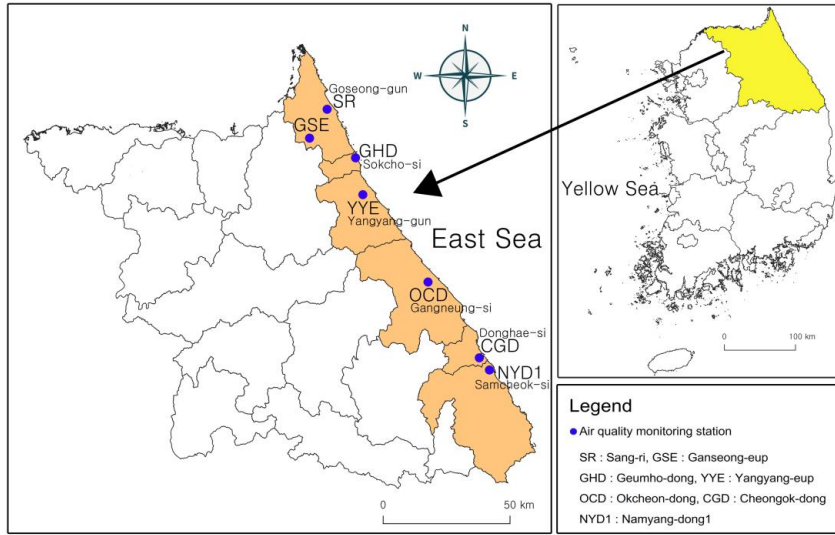


그림 2. 연구지역과 대기질 측정지점의 위치

등 6개의 대기환경기준물질을 측정하여 도시지역의 평균 대기질 농도를 파악한다. 교외대기측정망도 같은 항목을 측정한다. 이들 측정망 자료는 현재 에어코리아(Air Korea)를 통해 제공되고 있으며, 시간 자료와 일간 자료로 구분된다.

본 연구는 강원도 고성, 속초, 양양, 강릉, 동해, 삼척 등 6개 시군의 도시대기측정망과 교외대기측정망의 연도별 최종확정 시간 자료를 수집하였으며(그림 2), 산불이 미세먼지 농도는 물론 다른 대기질 항목의 변화에도 영향을 줄 수 있다고 생각하여, 이들 6개의 대기환경기준물질을 모두 분석하였다. 시간적 범위는 2015년부터 2019년까지 5년을 원칙으로 하였으나, 속초와 양양은 2019년부터 측정소를 운영하고 있어서, 2019년 1년 자료만을 사용하였다. 그리고 고성군의 경우, 2019년 2월부터 4월까지의 자료가 누락되어 해당 기간 자료는 같은 시군에 설치된 '상리 측정소' 자료를 사용하였다.

3. 분석 방법

1) 대기질 항목 간 상관분석

산불이 미세먼지를 비롯한 대기질에 영향을 주는지를 파악하기 위하여, 산불 발생 전후의 대기질 항목 간에 상관분석을 실시하였다. 통계분석은 오픈소스프로그램인 R(ver.4.0.2)을 이용하였다. 분석 대상 대기질 항목은 SO₂, CO, O₃, NO₂, PM₁₀, PM_{2.5} 등 6개이며, 시간별 자료

를 사용하였다. 각 항목별 표본은 '산불 직전 기간', '산불 기간'으로 구분하여 활용하였다. 여기서 '직전 기간'이란, 산불이 발생하기 전 3일을 의미하며, '산불 기간'은 한 산불이 발생하는 동안의 기간으로 정의하였다. 여기서 기간을 3일로 한정 한 이유는 일반적인 산불의 지속기간이 약 3일 정도이기 때문이다. 만일 이러한 구분 없이 산불이 발생하지 않은 전체 기간을 '산불 기간'과 비교한다면, 계절성과 같이 산불 이외의 다른 요인에 의한 불확실성이 증가할 것이다.

2) 산불강도 등급화

일반적으로 산불강도는 산불연소 전방의 단위 길이당 에너지 방출률(kW/m)을 의미한다.¹⁾ 하지만 본 연구는 산불 발생 정도를 등급화하기 위하여, 시간당 피해면적을 산불강도로 정의하였다. 여기서, 시간당 피해면적(ha/h)은 한 건의 산불이 발생한 전체피해면적(ha)을 산불발화에서 종료까지의 화재 지속시간(h)으로 나누는 것이다. 본연구는 시간당 피해면적을 기준으로 산불강도를 4개 등급으로 구분하였다(그림 3). 등급 구분 기준은 시간당 피해면적의 밀도 변화가 두드러지게 나타나는 구간이다. 구분된 등급은 시간당 피해면적 0.5ha미만, 0.5ha이상 - 1.8ha미만, 1.8ha이상 - 20ha미만, 21ha이상으로 나누었다.

3) 지역별 미세먼지 농도에 대한 t-검정

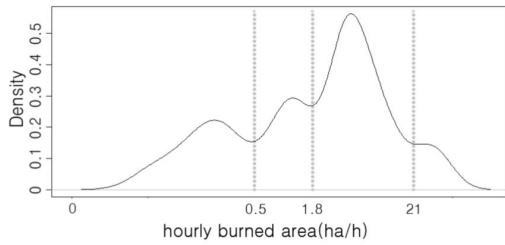


그림 3. 시간당 피해면적의 밀도 곡선

산불에 의해 미세먼지가 증가하는지를 파악하기 위하여, 지역별로 산불발화 전후 미세먼지농도에 대한 t-검정을 실시하였다. 미세먼지는 입자의 크기에 따라 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})로 세분되어 측정된다. 하지만, 본 연구에서 분석한 지역 및 기간 동안, 초미세먼지는 결측치가 다수 있어서, 미세먼지를 중심으로 분석하였다. 산불은 보통 특정 계절을 중심으로 발생하기 때문에, 산불 발생 기간과 그 이외의 기간을 비교하면 계절적 요인에 의한 간섭이 발생할 가능성이 크다. 따라서 본 연구에서는 지역별로 산불 발생 기간과 직전 3일 동안의 미세먼지 농도를 대상으로 독립표본 t-검정(Two sample t-test)을 실시하였다.

III. 연구결과

1. 산불 발생에 의한 대기질 변화

산불 발생은 미세먼지 농도 및 다른 일부 대기질 농도를 높이는 것으로 나타났다(표 2). 영동지역 6개 시군의 PM₁₀ 평균농도는 산불 발생 직전 기간에 48.47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으나, 산불 발생 기간에는 76.13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 증가하였

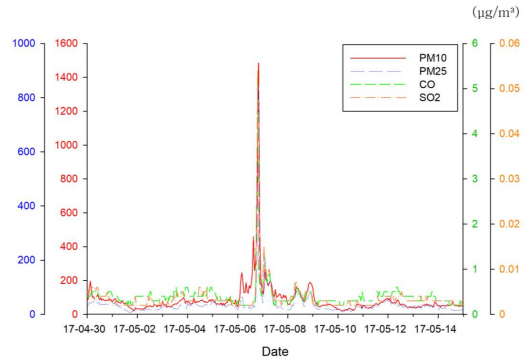


그림 4. 강릉의 2017년 5월 6일 대기질 변화

다($p < 0.001$). 약 1.57배 증가한 셈이다. PM_{2.5}의 경우에도, 산불 전 23.86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이던 평균 농도가 31.38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 1.31배 높아졌다($p = 0.004$). 강릉의 2017년 5월 6일 산불의 PM₁₀ 농도의 경우, 시간당 최고 1484 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 일평균 299 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 직전 기간의 5배로 증가하였다(그림 4).

산불은 SO₂와 O₃의 평균 농도도 증가시켰다. SO₂의 경우, 산불 발생 전 0.0033 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었던 평균 농도가 산불 발생 중에는 0.0041 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 1.24배 증가하였다($p < 0.001$). SO₂는 화재 시 영향을 받는 대기질 요소로 알려져 있다(박정은 등, 2005). 산불로 인해 영동지역의 O₃도 0.0412 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 0.0487 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 약 1.18배 증가하였다($p < 0.001$). O₃ 역시 대류권에서 생물 화재에 의해 증가할 수 있다(Kim and Newchurch, 1998).

이들 항목과 달리, NO₂와 CO의 농도는 감소하였다. NO₂는 0.0132 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 0.0116 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 농도값이 낮아졌다($p < 0.001$). CO 또한 0.4322 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 0.4211 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 농도 값이 감소하였으나, p-값 0.4로 통계적 의미가 없는 것으로 나타났다. CO와 NO₂는 화재환경에서 주로 발생되므로(유송현 등, 2013) NO₂의 산불 발생 시 농도

표 2. 산불 발생 전후 대기질 항목별 독립표본 t-검정 결과

	평균 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		표준편차		t-test		
	산불 전	산불 시	산불 전	산불 시	t	df	p-value
PM ₁₀	48.4724	76.1320	28.6789	90.5810	-11.03	567.17	<0,001
PM _{2.5}	23.8605	31.3808	15.2634	53.5669	-2.89	432.97	0,004
SO ₂	0.0033	0.0041	0.0020	0.0039	-5.04	588.57	<0,001
O ₃	0.0412	0.0487	0.0203	0.0185	-9.22	680.99	<0,001
NO ₂	0.0132	0.0116	0.0101	0.0074	4.70	746.02	<0,001
CO	0.4322	0.4211	0.2134	0.3088	0.84	608.92	0,4

감소 이유에 대해선 차후 원인 규명이 필요하다. CO의 경우, 산불과 같은 개방된 연소에선 거의 발생 되지 않는다(박영주 · 이해평, 2011).

2. 산불강도에 따른 대기질 변화

산불 발생 시 대기질 농도는 산불강도에 따라 변화되는 것으로 나타났다(그림 5). 이때, 0.5ha/h 이하인 구간에서는 대부분의 대기질 항목이 산불 직전 기간과 비슷하였다. 이것은 약한 산불강도에서는 미세먼지 등 대기질이 평소 수준과 다르지 않음을 의미한다.

하지만, 산불강도가 0.6ha/h 이상이 되면 대기질 농도가 산불강도에 따라 증가되거나 감소하는 특성이 있었다. 예를 들어, PM₁₀과 NO₂의 농도는 산불강도가 클수록 뚜렷하게 증가하였다. PM₁₀, NO₂, PM_{2.5} 농도의 중앙값은 0.6~1.8ha/h 구간에서 가장 낮았으며, 산불강도가 증가하면 농도도 함께 증가하였다. 반면, SO₂, CO, O₃의 농도는 산불강도가 증가할수록 낮아지는 경향이 있었다. SO₂와 O₃의 농도는 0.6~1.8ha/h 구간에서 최대값을 나타내고 이보다 산불강도가 커지면 농도가 낮아졌다. CO의 경우엔 거의 모든 산불강도에서 중앙값에 변화가 없었으나, 21ha/h 이상인 산불강도에서는 그 값이 크게

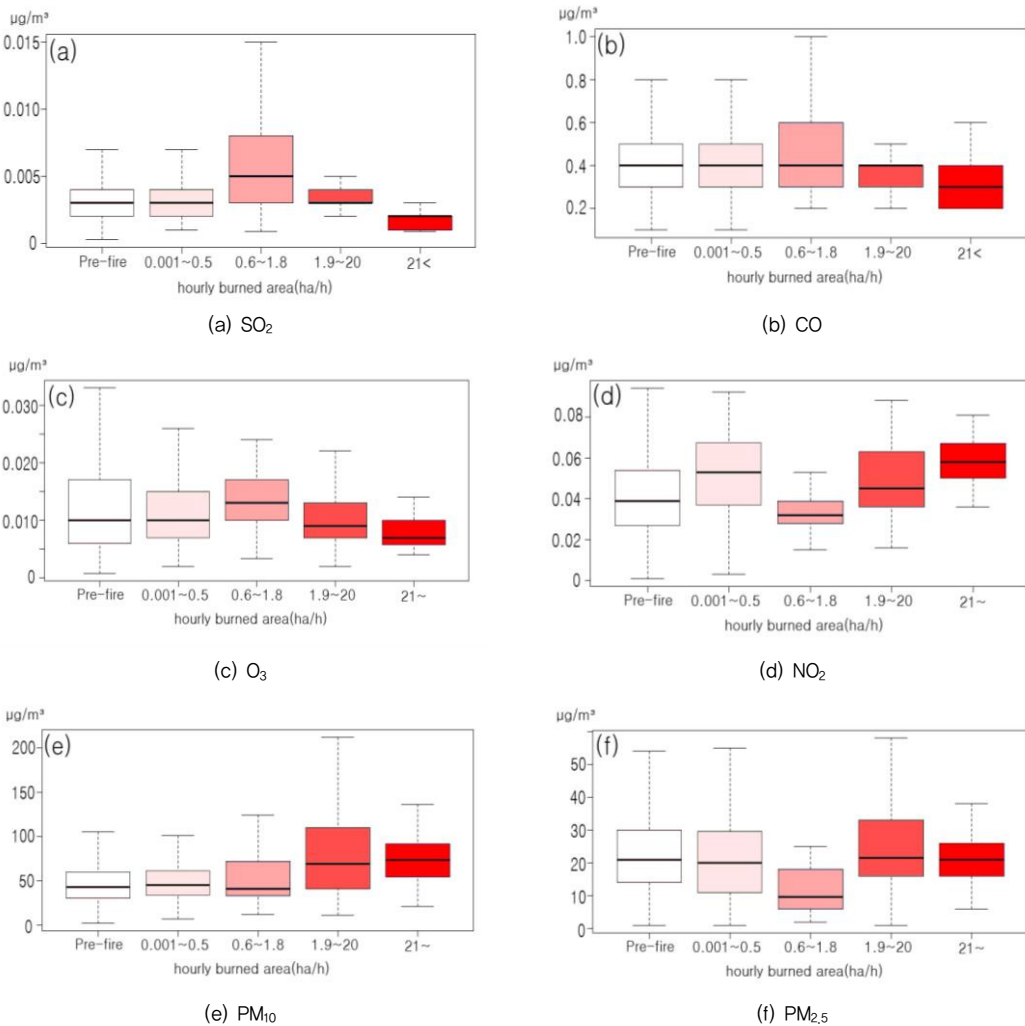


그림 5. 시간당 피해면적에 따른 대기질 요소 변화

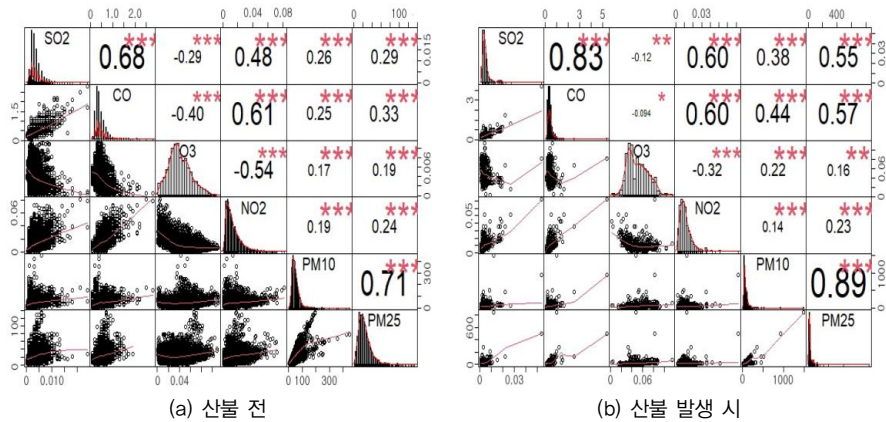


그림 6. 대기질 요소 간 상관분석

낮아졌다. 이렇게 볼 때, 산불강도는 적어도 0.6ha/h 이상인 경우에 대기질 농도 변화에 영향을 주며, 이 경우 대기환경기준물질별로 그 반응이 다르게 나타난다고 할 수 있다.

3. 대기질 항목 간 상관성

산불은 PM₁₀과 PM_{2.5}, SO₂와 CO, SO₂와 PM_{2.5} 등 대기환경기준물질 간의 상관성을 높이는 것으로 나타났다(그림 6). SO₂와 CO의 경우 산불 직전 기간에는 상관계수는 0.68이었으나, 산불 기간에는 0.83으로 두 변수 간의 상관계수가 증가하였다. 또한 미세먼지 PM₁₀과 초미세먼지 PM_{2.5}의 상관계수도 0.71에서 0.89로 상승하였다. 이것은 산불이 미세먼지와 초미세먼지, 아황산가스 등의 배출량을 높이기 때문으로 생각된다. 특히, PM_{2.5}와 다른 대기질 요소들 간의 상관성이 크게 변화하였다. SO₂와 PM_{2.5}간의 상관성은 0.29에서 0.55로 변화하였다. 산불은 PM_{2.5} 등 미세먼지를 증가시키고(Arriagada *et al.*, 2020), SO₂ 농도에도 영향을 준다(박정은 등, 2005). 또한 CO와 PM_{2.5}의 상관성 또한 0.33에서 0.57로 크게 변화하였다.

4. 지역별 미세먼지 변화

산불 발생 기간과 산불 직전 기간의 미세먼지 농도 차이는 명확하게 구별되었다. 여섯 지역 중 속초를 제외한 다섯 지역에서 산불 발생 기간의 평균 미세먼지 농도가 산불 직전 기간보다 높았으며, 통계적으로 유의미한 것

으로 나타났다(표 3). 고성군의 경우, 평상시 미세먼지 평균 농도는 44.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으나, 산불 발생 시 66.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 증가하였다($p < 0.001$). 양양군의 경우 평상시 19.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도를 보였으나, 산불 발생 시 79.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 값을 보였고($p = 0.009$), 강릉시의 경우는 평상시 51.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 산불 발생 시 97.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 값을 나타냈다($p < 0.001$). 동해시는 41.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 56.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 증가하였으며($p = 0.008$), 삼척시는 평상시 49.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 산불 발생 시 64.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다($p < 0.001$). 반면, 속초는 산불 발생 기간이 산불 직전 기간보다 미세먼지 농도가 낮은 것으로 나타났다. 이것은 속초의 산불 및 미세먼지 자료가 양적으로 충분하지 않기 때문이다. 지난 5년간 속초에서는 단 1건의 산불만 발생하였으며, 피해면적도 1.3ha에 불과하였다. 또한 속초시 금호동 대기질 측정소가 산과 멀리 떨어진 바닷가에 위치해 있다는 점도 산불로 인한 미세먼지 증가가 나타나지 않은 이유일 수 있다.

IV. 고찰

영동지역은 2003-2019년에 발생한 전국 산불피해 면적 중 47%를 차지한다. 하지만 산불건수는 전국의 3%에 불과하다. 이것은 영동지역 산불이 쉽게 대형화됨을 의미하며, 그 피해는 매우 심각하다. 산림의 소실뿐 아니라, 인명피해, 토양침식, 수질오염, 생태계 변화 등 다양한 피해를 일으킨다(이명보, 2006). 이렇게 알려진 피해들 이외에 산불 발생은 대기질 전반에 영향을 미친다. 특히, 미세먼지가 큰 영향을 받는다. 영동지역에서 산

표 3. 산불 발생 전후 미세먼지 독립표본 t-검정 결과

지역	구분*	시간(h)**	평균	표준편차	t	df	p-value
고성군	산불 전	1,584	44.5	27.1	3.82	73.17	<0,001
	산불 시	74	66.2	47.8			
속초시	산불 전	84	32.5	9.2	-2.69	68.20	0,009
	산불 시	3	29.7	0.6			
양양군	산불 전	15	19.4	5.0	3.91	25.36	<0,001
	산불 시	26	79.0	77.5			
강릉시	산불 전	3,394	51.1	24.9	4.73	194.78	<0,001
	산불 시	200	97.4	136.5			
동해시	산불 전	349	41.9	17.3	3.30	9.86	0,008
	산불 시	10	56.3	13.5			
속초시	산불 전	1,750	49.5	37.2	4.80	313.15	<0,001
	산불 시	265	64.1	47.0			
합계	산불 전	7,176	48.5	28.7	-11.03	567.17	<0,001
	산불 시	578	76.1	90.6			

* 산불 전은 산불 발생 시점의 3일 전을 의미함.

** 산불 전의 시간은 산불의 발화 시점 이전의 '산불 직전 기간' 시간(h), 산불 시의 시간은 산불의 발화 시점 ~ 진화 시점까지의 시간(h)을 의미함.

불 기간 중 미세먼지 농도는 평균 76.13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 초미세먼지 농도는 31.38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 이 수치는 산불 직전 기간에 비해 각각 1.6배, 1.3배 정도 높다. 이는 미세먼지와 초미세먼지 등급을 모두 '보통'의 최고점에 놓이게 하는 수치이다.²⁾ 미세먼지 농도가 직전 기간에 비해 1.6배로 상승한다는 것은 봄철 산불의 미세먼지 기여도가 약 37%임을 의미한다. 하지만, 산불에 의한 미세먼지 기여도를 정확히 평가하기 위해서는 수도권 및 영서지역에서 유입되는 미세먼지 농도, 영동에서 자체적으로 발생하는 미세먼지 농도, 배경 농도 등을 구분해 분석할 필요가 있다. 이에 대한 논의는 추후 연구로 넘기고자 한다.

영동지역에서 인구가 가장 많은 강릉의 경우, 산불에 의한 미세먼지 증가는 더욱 심각하다. 산불 기간 중 강릉시의 미세먼지 농도는 평상 시의 2배에 해당하는 97.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 증가하였다. 이것은 현행 미세먼지 농도 등급에서 '나쁨'에 해당하는 수치이다. 2017년 5월 6일 20시에는 PM₁₀ 농도가 1484 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 달하는 등, 일평균 미세먼지가 299 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 '매우나쁨' 등급을 크게 상회하였다. 미세먼지와 더불어, PM_{2.5}, CO, SO₂ 농도 또한 평상시에 비해 급증한 것으로 나타났다.

본 연구는 영동지역 산불과 미세먼지 농도의 상관성을 보여줌으로써 늦겨울과 봄철 영동지역 대기질 변화

에 대한 새로운 관점을 제시하였다. 대형산불이 자주 발생하는 영동지역에선, 대기질 악화에 산불이라는 추가적 요소를 고려하여야 한다. 영동지역은 중국 및 우리나라 서부 지역과 경향이 비슷한 영서지역과는 봄철 대기질 패턴이 다르게 나타난다. 또한 겨울철과 봄철에 일관되게 높은 영동지역 미세먼지(차승환 등, 2020)의 원인에 하나의 답안을 추가하였다. 산불 기간이 길고 산불강도가 증가할수록 고농도의 미세먼지가 발생한다는 것도 확인하였다. 따라서, 대형 산불이 발생하는 경우, 화재로 인한 인명 피해뿐만 아니라 미세먼지 급증 등 대기질 악화로 인한 건강 영향도 고려할 필요가 있다(양원호, 2019).

이러한 성과에도 불구하고, 본 연구는 자료 부족 및 불확실성에 기인한 다소의 문제점을 안고 있다. 먼저, 대기질 측정소가 영동 시군에 대부분 한 개씩 있어서 그 대표성에 상당한 문제가 있다. 대기질 측정지점과 산불 발생 위치가 멀리 떨어져 있는 경우, 분석의 신뢰성도 낮아진다. 서울특별시의 경우, 도시대기측정소와 도로변대기측정소를 합쳐 현재 40개의 측정지점이 있다. 즉 15.1km² 마다 1개의 측정소가 있는 셈이다. 반면, 영동 지역에는 현재 도시대기측정소와 교외대기측정소를 합쳐 7개의 지점이 있어, 544km² 당 1개의 측정소가 있을

뿐이다. 본 연구에서 사용한 산불 자료의 공간적 정확성도 보완해야 할 대상이다. 현재 산림청에서 제공하는 산불피해대장은 산불 기간과 규모에 대한 정보를 얻을 수 있으나, 공간 자료는 발화지점의 주변 자료만을 알 수 있다.

V. 결론

영동지역은 봄철 산불 다발지역이며, 산불 피해면적이 큰 지역이다. 본 연구는 영동지역 산불이 미세먼지 배출에 어떤 영향이 있는지를 확인하고자 하였다. 고성, 속초, 양양, 강릉, 동해, 삼척 등 6개 지역을 대상으로 지난 5년간의 산불 발생과 대기질 항목 간의 관계를 분석하였다. 이를 위해 산불 발생 자료, 대기질 측정 자료를 수집하였다. 분석 결과, 산불은 미세먼지 증가에 상당한 영향을 주며, 다른 일부 대기질 항목의 농도 또한 상승시키는 것으로 나타났다. 산불은 미세먼지를 직전 기간에 비해 1.6 배 증가를 시켰으며, 산불강도가 증가할수록 더욱 고농도의 미세먼지를 배출하였다. PM_{2.5}, CO, SO₂ 농도도 산불 발생 시 증가하였다. 이러한 결과는 산불 발생이 고농도 미세먼지를 유발하고 지역 미세먼지 농도를 높이는 주요 원인이 될 수 있음을 의미한다. 따라서 영동지역에서는 산불 발생 시, 미세먼지 등 대기질 농도 악화를 경고하고 건강상 안전 확보에 대한 대비가 필요하다.

본 연구는 영동지역의 미세먼지 농도에 대한 새로운 배출원인을 실증적으로 제시했다는 점에서 의의가 있다. 하지만, 산불 발생 위치와 대기질 측정소 간의 공간적 불일치, 대기질 측정지점의 부족에서 오는 추정상의 오류 등의 연구 한계가 있다. 후속 연구는 이점을 보완해야 할 것이다.

註

- 1) 일반적으로 산불강도(I)는 소비된 연료의 열량(H, cal/g), 연료 무게(W, t/ha), 확산속도(R, m/min)에 비례하기 때문에, 이들의 곱으로 계산한다(Byram, 1959). 즉, $I = HWR$.
- 2) 미세먼지 등급은 31~80, 초미세먼지 등급은 16~35가 '보통'이다.

참고문헌

- 김기환·김오석, 2019, "시계열 분석을 활용한 한·중 월경성 미세먼지 연구" 한국지리학회지, 8(1), 33-46.
- 김신도·김창환, 2008, "서울지역 미세먼지의 물리화학적 특성" 서울시연구, 9(3), 23-33.
- 김종연·윤대옥·김영훈·신원정, 2019, "청주시 미세먼지 배출원의 특성과 대책에 대한 연구" 한국지리학회지, 8(3), 399-415.
- 미세먼지특별대책위원회, 2019, 미세먼지 관리 종합계획 [2020~2024].
- 박샘·최광용, 2016, "위성영상에 탐지된 1980년대 이후 수도권 지역의 도시 팽창" 한국지리학회지, 5(3), 331-343.
- 박순애·신현재, 2017, "한국의 초미세먼지 (PM 2.5)의 영향 요인 분석: 풍향을 고려한 계절성 원인을 중심으로" 환경정책, 25(1), 227-248.
- 박승명·문광주·박종성·김현재·안준영·김정수, 2012, "2009년 서울지역 황사 및 고농도 미세먼지 사례 시 미세먼지의 화학성분 특성" 한국대기환경학회지, 28(3), 282-293.
- 박영주·이해평, 2011, "산불화재 감식을 위한 연소생성물의 응용에 관한 연구" 한국안전학회지, 26(4), 111-119.
- 박정은·이철규·이한림·정진상·이권호·김정은·김영준, 2005, "중국 동부 지역 화재로 인한 광주의 대기질에 대한 영향" 대한환경공학회 학술발표논문집, 681-683.
- 손혜영·김철희, 2009, "부산지역 대기측정망 자료에 나타난 미세먼지 농도의 시계열 해석" 한국대기환경학회지 (국문), 25(2), 133-140.
- 양원호, 2019, "기후변화에 따른 대기오염물질 농도 변화 및 미세먼지 노출에 의한 건강 영향" 보건복지포럼 2019(3), 20-31.
- 유송현·최문수·박상태·홍성호·유상필, 2013, "화재현장 연소가스 감지소자 감도성능검증 연구" 한국화재소방학회 학술대회논문집, 128-129.
- 윤혜연·장동호, 2021, "우도비를 적용한 경상북도 산불 발화지의 공간분포 특성 연구" 한국지리학회지, 10(1), 167-180.
- 이명보, 2006, "우리나라 산불발생 특성" 한국방재학회지, 6(1), 29-39.
- 이현주·정여민·김선태·이우섭, 2018, "한반도 미세먼지 발생과 연관된 대기패턴 그리고 미래 전망" 한국기후변

- 화학회지, 9(4), 423-433.
- 정권·이준복·강미혜·안미진·김주형·김민영, 2007, “서울지역 고농도미세먼지 발생원인” 한국대기환경학회 학술대회논문집, 524-525.
- 주재희·황인조, 2011, “도시대기측정망 자료를 이용한 대구 지역 대기오염물질의 공간분포에 관한 연구” 한국대기환경학회지(국문), 27(5), 545-557.
- 치승환·한영지·배귀남, 2020, “측정망 자료를 이용한 강원지역 PM 10 및 PM 2.5 농도의 시간변화 및 공간 분포” 한국대기환경학회지(국문), 36(4), 492-506.
- 최광용, 2020, “우리나라 영동지역에 부는 양간지풍 (襄杆之風) 의 기후학적 특성” 기후연구, 15(2), 49-66.
- 황승연·문진용·김정준, 2019, “R을 이용한 서울시 교통량과 미세먼지 발생의 상관관계 분석” 한국인터넷방송통신학회 논문지, 19(4), 139-149.
- Arriagada, N.B., Palmer, A.J., Bowman, D.M., Morgan, G.G., Jalaludin, B.B., and Johnston, F.H., 2020, Unprecedented smoke-related health burden associated with the 2019-20 bushfires in eastern Australia, *Medical Journal of Australia*, 213(6), 282-283.
- Byram, G.M., 1959, Combustion of forest fuels, *Forest Fire: Control and Use*, 61-89.
- Kim, J.H. and Newchurch, M.J., 1998, Biomass-burning influence on tropospheric ozone over New Guinea and South America, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103(D1), 1455-1461.
- Lazaridis, M., Latos, M., Aleksandropoulou, V., Hov, Ø., Papayannis, A., and Tørseth, K., 2008, Contribution of forest fire emissions to atmospheric pollution in Greece, *Air Quality, Atmosphere & Health*, 1(3), 143-158.
- Rodríguez, Y.C., Rodríguez, M.P.R., Batista, A.C., Reina, J.M.C., and Sierra, C.A.M., 2017, Fire Statistics in Pinar del Río Province, Cuba, *Environment and Ecology Research*, 5(2), 93-99.
- Xie, Y., Lin, M., and Horowitz, L.W., 2020, Summer PM2.5 pollution extremes caused by wildfires over the western United States during 2017-2018, *Geophysical Research Letters*, 47(16), e2020GL089429.
- 산림청, 「산불통계 산불피해대장」, <https://www.forest.go.kr> (2020. 11. 23.)
- 교신 : 최광희, 25601, 강원도 강릉시 범일로579번길 24, 가톨릭관동대학교 지리교육과(이메일: geoist@cku.ac.kr)
- Correspondence: Kwang Hee Choi, 25601, 24 Beomil-ro 579beon-gil, Gangneung-si, Gangwon-do, Korea, Department of Geography Education, Catholic Kwandong University (Email: geoist@cku.ac.kr)

투고접수일: 2021년 11월 15일
심사완료일: 2021년 12월 7일
게재확정일: 2021년 12월 17일