

중남미연구 제42권 2호

2023년 5월 31일 59~82쪽

DOI <http://dx.doi.org/10.17855/jlas.2023.5.42.2.59>

칠레 빠드레라스까사스 지역에서 대기환경지수를 이용한 초미세먼지 특성 연구*

장 유 운

(한국외국어대학교)

- I. 서론
- II. 연구방법
- III. 연구결과
- IV. 결론

* 이 논문은 2019년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원(NRF-2019S1A6A3A02058027)과 2023학년도 한국외국어대학교 교원연구지원사업 지원에 의하여 이루어진 연구임

본 연구의 목적은 칠레 중남부에 위치한 빠드레라스까사스(Padre Las Casas) 지역에서 바이오매스 연소로 인해 발생하는 초미세먼지를 환경기준과 대기환경지수를 활용하여 특성을 이해하는 것이다. 분석 자료는 칠레 환경부에서 2013년 3월부터 2022년 12월까지 측정한 1시간 관측자료를 이용하였다. 환경기준은 세계보건기구와 칠레 정부의 24시간 환경기준과 연평균 환경기준을 적용하였다. 이 지역의 연평균 초미세먼지는 $41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 세계보건기구의 환경기준보다 8배 높았으며, 칠레 정부의 기준보다는 2배 높은 것으로 분석되었다. 분석기간 동안 초미세먼지는 통계적으로 장기간 유의한 변화는 없었다($p \text{ value} > 0.05$). 그러나 이 지역에서 연평균 대기환경지수는 장기간 나쁨 단계 수준인 것으로 평가되었기 때문에, 초미세먼지 배출량 감소가 필요하며, 이것은 천연가스 또는 재생에너지 발전량 확대를 통한 바이오연료 사용 저감을 위한 추가 정책 도입의 필요성을 보여준다.

주제어

빠드레라스까사스, 초미세먼지, 바이오매스 연소, 환경기준, 대기환경지수

I. 서론

칠레의 수도 산티아고는 겨울철 초미세먼지 농도가 세계적으로 매우 높다. 이는 다른 대도시와 달리 겨울철 바이오매스 연소의 영향이 크기 때문이다 (Langner et al., 2020, p. 1121). 바이오매스 연소로 인한 고농도 초미세먼지 발생은 칠레 중남부지역에서 계속되고 있으며, 산티아고도 이에 포함된다 (Molina et al., 2017, p. 653; Villalobos et al., 2017, p. 514). 칠레 환경부는 이를 해결하기 위해 주요 발생 원인인 낡은 스토브 교체, 습도를 낮춘 규격화한 연료 사용 그리고 가정의 단열을 위한 보조금 지원 제도를 시행하고 있다 (Jorquera, 2021, p. 3; Ruiz-Tagle & Schueftan, 2019, pp.1-2).

칠레의 많은 도시에서 대기질이 개선되고 있지만, 여전히 겨울철에는 환경 기준을 초과하는 경우가 있다(Molina et al., 2017, p. 657). 고농도 초미세먼지는 다양한 형태로 시민들의 건강에 영향을 미칠 수 있다. 가정에서 바이오매스 연소를 이용한 요리와 난방은 중남미 이외에도 아프리카, 동남아시아, 그리고 유럽에서도 계속 사용되고 있어서, 이로 인해 실내 대기오염과 관련한 우려가 높다(Kansime et al., 2022, pp. 9-10; Soleimanian et al., 2022, p. 3; Xing et al., 2021, pp. 14). 또한, 산불이나 가정용 바이오매스 연소는 주변 지역에 대한 대기오염을 발생시킨다(Aguilera et al., 2021, 3). 예를 들어, 아마존 열대우림에서 건기에 주로 발생하는 산불은 인근 도시의 대기질에 영향을 미칠 수 있으며, 칠레 중남부 지역과 같이 겨울철 가정 난방을 위해 사용하는 바이오매스는 해당 지역의 대기질을 악화시키는 요인이 된다(Cubillos & Blazquez, 2021; Urrutia-Pereira et al., 2021, p. 4).

인구 5만 명 정도인 빠드레라스까사스(Padre Las Casas) 지역은 겨울철 바이오매스 연소로 인해 대기오염이 매우 심각한 지역으로 잘 알려져 있다. 이 지역에서는 도시 내 공간 분포에 따른 오염물질에 관한 연구가 많이 수행되고 있다(Blanco et al., 2022, p. 8; Boso et al., 2022, p. 11). 특히, 가난한 지역 주민들은 코로나19 시기에도 가정에서 오래된 스토브를 이용하거나 저렴한 연료를 사용하기 때문에, 다른 지역에 비해 초미세먼지가 더 많이 발생하는 것으로 분석되었다(Blanco et al., 2022, p. 9).

고농도의 초미세먼지는 호흡기와 심장질환과 관련한 건강에 악영향을 끼친다는 것은 잘 알려져 있다(Weichenthal al., 2017, p. 329). 빠드레라스까사스 지역에서는 초미세먼지에 의한 건강 영향에 관한 연구가 진행되지 않았다. 초미세먼지의 건강 영향을 평가하기 위해서는 초미세먼지 농도 측정과 함께 자연사한 사망자 정보와 원인 정보가 필요하지만(Brito et al., 2022, p. 2; Yap & Garcia, 2015, p. 773), 이 지역에서는 이러한 정보를 제공하지 않고 있다. 초미세먼지는 낮은 농도에서도 민감한 시민들에게 건강 영향을 끼칠 수 있어서, 세계보건기구(WHO)는 초미세먼지 농도를 24시간 평균 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 유지하도록 권고하고 있다(WHO, 2021). 그리고 초미세먼지에 대한 대기환경 지수는 시민들이 고농도 초미세먼지에 대해 대처할 수 있도록 돕고 있다.

본 연구에서는 바이오매스 연소로 인한 초미세먼지가 빠드레라스까사스 지역 시민들의 건강에 미치는 영향을 이해하기 위해 초미세먼지 환경기준과 대기환경지수에 따른 특성을 분석하였다. 이러한 연구를 통해 초미세먼지가 시민들의 활동과 건강에 미칠 수 있는 영향을 이해하고 지역의 대기질 개선 정책의 영향을 평가하고자 하였다.

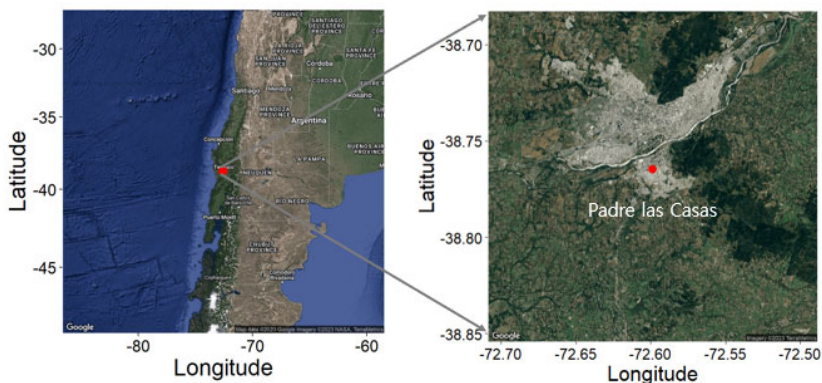
II. 연구방법

1. 초미세먼지 자료와 기상자료

대상 지역은 칠레 남부의 테무코(Temuco)시에 있는 빠드레라스까사스 지역이다. 빠드레라스까사스 지역은 까우틴(Cautin) 강을 중심으로 테무코시의 남쪽에 위치하며 지형은 평지를 이루고 있다(그림 1). 이 지역은 서쪽으로 60km 지점에 태평양이 위치하고 있으며, 겨울철에는 바이오매스를 이용한 난방으로 인해 심각한 대기오염이 발생하는 지역이다. 이에 따라, 칠레 정부는 2012년부터 이 지역에 대기자동측정소를 설치하여 대기오염물질을 측정하고 있다.

이 연구에서는 칠레 환경부의 대기측정망(Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire, SINCA)에서 제공하는 1시간 간격의 초미세먼지 측정 자료와 기상청에서 관측하는 1시간 간격의 풍속, 풍향, 습도, 기압 등의 기상자료를 사용하였으며, 강수량 자료는 6시간 누적 강수량 자료를 활용하였다. 분석 기간은 2013년 3월 1일부터 2022년 12월까지의 자료를 사용하였다.

그림 1. 빠드레라스까사스 지역과 측정소 위치



2. 환경기준과 대기환경지수

세계보건기구는 초미세먼지의 24시간 환경기준으로 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 권장하고 있으며, 많은 국가에서는 이보다 더 높은 기준을 적용하고 있다. 칠레 정부는 초미세먼지에 대한 24시간 환경기준을 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 정하고 있다. 초미세먼지에 대한 연평균 환경기준은 세계보건기구는 $5\mu\text{g}/\text{m}^3$, 칠레 정부는 $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 적용하고 있다.

대기환경지수는 미국환경청(EPA)에서 제시하는 변환 수식을 적용하여 산출하였다(EPA, 2018). 대기환경지수는 좋음, 보통, 민감군에 나쁨, 나쁨, 매우 나쁨, 위험의 6단계로 구분되며, 각 단계의 기준 지수는 0~12.0, 12.1~35.4, 35.5~55.4, 55.5~150.4, 150.5~250.4 그리고 250.5~500.4로 설정하였다.

칠레 정부는 초미세먼지가 심각할 경우 시민들이 야외활동을 자제하고, 난

방 기구 사용을 자제하도록 권고하기 위해서 4단계의 초미세먼지 예보제를 시행하고 있다. 각 단계의 초미세먼지 기준 농도는 $80\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하, $80\sim110\mu\text{g}/\text{m}^3$, $110\sim170\mu\text{g}/\text{m}^3$, 그리고 $170\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상으로 정해져 있다.

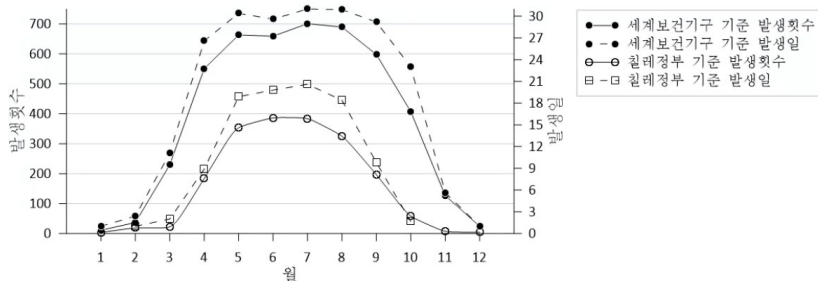
III. 연구결과

1. 초미세먼지의 환경기준 초과 사례 분석

칠레 빠드레라스카사스 지역은 초미세먼지 농도가 높은 지역 중 하나이다. 분석기간 동안 이 지역의 연평균 초미세먼지는 $41\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 세계보건기구보다 8배 높았으며, 칠레 정부의 기준보다는 2배 높은 것으로 분석되었다.

이 지역에서 24시간 평균 환경기준을 초과한 연평균 발생 비율은 세계보건기구와 칠레 정부 기준의 경우 각각 48.9%와 19.2%이었다. 그리고 24시간 평균 환경기준을 초과한 연평균 발생일은 세계보건기구와 칠레 정부의 경우 각각 220일과 97일이 발생하였다. 칠레 정부보다 엄격한 환경기준을 적용하고 있는 한국과 일본 그리고 미국의 24시간 평균 기준인 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 적용하면, 환경기준을 초과한 연평균 발생율과 발생일은 평균 27.1%와 136일이었다.

그림 2. 분석기간 동안 월별 초미세먼지의 24시간 환경기준 초과 횟수와 초과일 특성



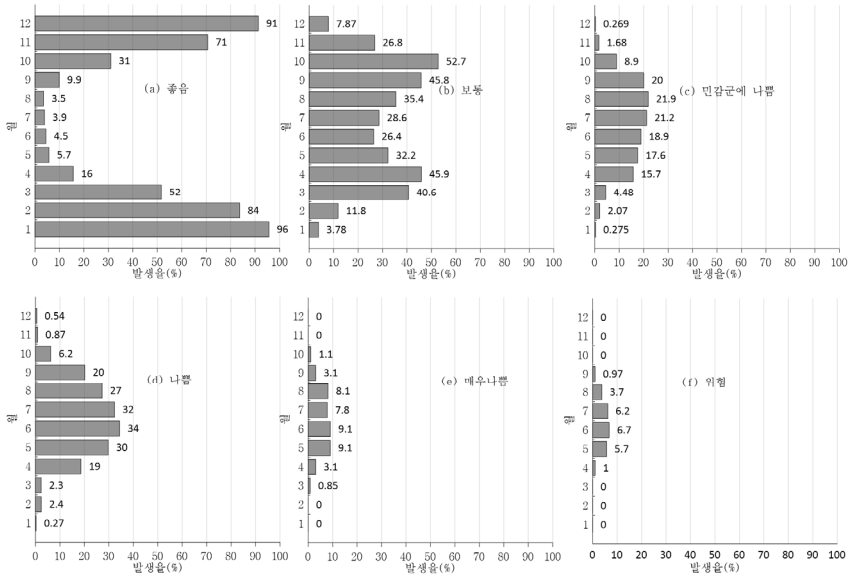
칠레의 여름철인 12월부터 2월까지 초미세먼지는 세계보건기구와 칠레 정부의 24시간 평균 환경기준 내에 분포하였다. 그러나 겨울철에는 난방용 에너지로 바이오매스를 사용하여 이 지역의 월별 초미세먼지는 증가하는 경향을 보였다. 세계보건기구의 24시간 환경기준에서는 5월부터 9월까지 매월 25일 이상 기준을 초과하였고, 4월부터 10월까지 관측자료 중 80% 이상 기준을 초과하였다. 칠레 정부의 24시간 환경기준에서는 5월부터 7월까지 매월 15일 이상 기준을 초과하였고, 5월부터 7월까지의 월평균 50% 이상이 기준을 초과하였다(그림 2).

2. 대기환경지수

이 지역에서 대기환경지수의 좋음과 보통에 해당하는 구간의 평균 농도는 $6.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $21.8\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 칠레의 연평균 환경기준인 $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 수준이었다. 민감군에 나쁨과 나쁨의 경우는 평균 $44.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $88\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었지만, 매우 나쁨과 위험 지수는 $192\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $410\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 칠레의 24시간 환경기준보다 3.8배와 8.2배 높게 관측되었다.

대기환경지수의 단계별 발생율은 좋음과 보통은 연평균 42.3%와 27.7%였으며, 민감군에 나쁨 이상은 연평균 27.1%였다. 그렇지만, 각 지수별 발생율은 계절에 따라 발생 비율이 큰 차이를 나타내었다(그림 3).

그림 3. 분석기간 동안 대기환경지수에 따른 발생율



이 지역에서는 여름(12월, 1월, 2월)에 월 평균 90% 이상이 대기환경지수가 좋은 것으로 평가되었다. 민감한 사람들은 외부에 장시간 머무르거나 무리한 운동은 자제해야 하는 보통 지수는 봄(9, 10, 11월)과 가을(3, 4, 5월), 겨울(6, 7, 8월)에 26.4%(6월)에서 52.7%(10월)로 대기환경지수 중 가장 많이 관측되었다. 심장질환이나 폐질환이 있는 사람들과 어린이와 노령자가 장기간 야외운동은 자제해야 하는 민감군에 나쁨 지수는 4월부터 9월까지 월평균 15% 이상 발생하였다. 심장질환과 폐질환이 있는 사람과 어린이들이나 노약자들은 야외활동과 무리한 운동은 자제해야 한다는 나쁨 지수는 5월부터 9월까지 월평균 20% 이상 발생하였으며, 6월과 7월에는 30% 이상을 초과하였다. 심장질환과 폐질환이 있는 사람이나 어린이와 노약자는 무리한 운동은 피해야 하는 매우 나쁨과 정상인도 무리한 운동은 피해야 하는 위험 지수는 5월부터 8월까지 12% 이상 발생하였다.

3. 고농도 초미세먼지 발생시 시민들의 야외활동 자제를 위한 예보제

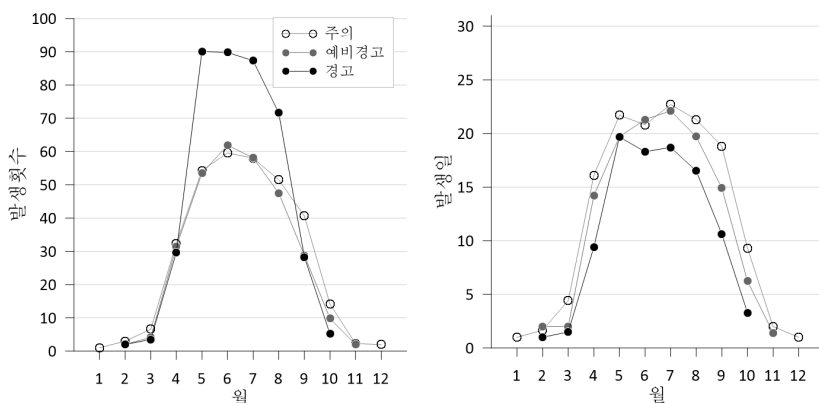
한국의 경우, 환경부는 국민 건강 보호 및 선제 대응 차원에서 국가 예보제를 도입했으며, 초미세먼지가 $81\mu\text{g}/\text{m}^3$ 부터 야외활동 자제를 권고하고 있다. 칠레 정부도 초미세먼지가 심각한 날에는 주의, 예비경보, 경보를 발령하여 시민들의 야외활동을 자제하거나 배출원이 되는 오래된 스토브 사용을 1개로 규제하고 있다.

칠레에서는 겨울철에 초미세먼지가 24시간 환경기준을 초과한 사례가 가장 빈번하였으며, 이 시기에 고농도로 분포하는 초미세먼지는 시민들의 건강에 부정적인 영향을 끼치기 때문에 예보제를 시행하는 것이 중요하다(Zaini et al., 2022).

분석기간 동안 관측된 초미세먼지 농도를 예보제 기준에 적용해보면 주의와 예비경고, 경고 단계의 평균 농도는 93.8 , 135 , $322\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다. 예보제에서 좋음의 경우는 경고보다 21배 낮은 평균 $19.9\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 분포하였다. 이 농도는 세계보건기구의 24시간 평균인 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 여전히 나쁜 수준이다.

분석기간 동안 칠레에서 경고 단계에 해당하는 농도는 주의나 예비 경고보다 평균 1.3배 많이 발생하였으며, 경고 수준의 농도는 5월부터 9월까지 매월 평균 15일 이상 관측되었다(그림 4). 주의와 예비경고는 4월부터 9월까지 평균 14일 이상 해당하였다. 반면 1월부터 3월 그리고 11월과 12월에는 주의 이상의 예보는 5일 이내로 낮았으며, 발생 횟수도 총 10회 이하로 적었다. 따라서, 이 지역에서는 4월부터 9월까지 야외활동에 주의해야 할 것으로 나타났다.

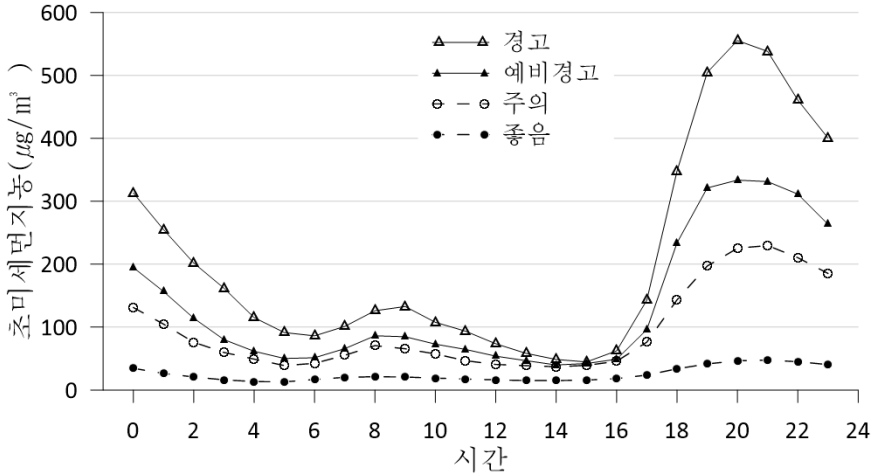
그림 4. 분석기간 동안 칠레 예보단계에 따른 초미세먼지 발생횟수와 발생일



여름철을 제외하면, 칠레 정부의 예보제에서 주의 이상의 예보가 4월부터 10월까지 빈번하게 발생하고 있어서, 하루 동안의 초미세먼지의 분포 특성을 그림 5에 나타내었다. 농도분포는 야간시간(19시~24시)에 모든 예보 단계에서 높게 발생하였으며, 오전 시간(7시~12시)의 평균이 가장 낮았다. 경고 단계를 제외하고 새벽(1시~6시)과 오후(13시~18시)의 평균 농도는 유사한 분포를 나타내었다. 그러나 경고 단계에서는 새벽 시간대의 농도가 오후보다 1.3 배 높게 분포하였다. 하루 중 농도가 가장 낮은 시간대는 13시~14시로 모든 예보 단계에서 가장 낮은 농도를 나타내었다. 예보제에서 주의 이상의 일별 농도 분포는 세계보건기구와 칠레 정부의 24시간 환경기준을 대부분 초과하였다.

예보제에서 주의 이상의 일별 농도 분포는 세계보건기구와 칠레 정부의 24시간 환경기준을 대부분 초과하였기 때문에, 칠레 정부는 환경 오염에 대한 대책을 강화할 필요성이 있다.

그림 5. 분석기간 동안 초미세먼지 예보에 따른 일간 농도 변화



4. 겨울철 고농도 초미세먼지 발생 특성

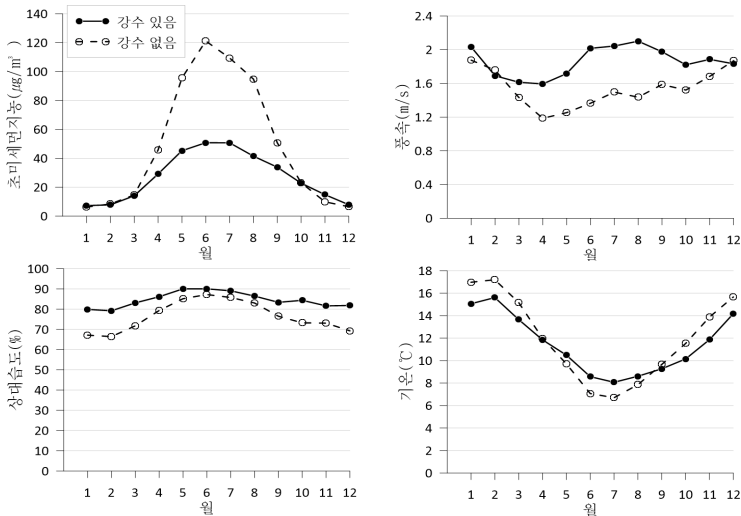
빠드레라스까사스 지역에서 초미세먼지가 환경기준을 초과한 발생횟수와 발생일은 겨울철에 가장 빈번하게 발생하였다. 초미세먼지는 기온, 풍속 그리고 강수량에 따라 대기 농도가 영향을 받는다(Molina et al., 2023, p. 6). 이 지역에서는 겨울철에 초미세먼지 농도가 여름철에 비해 10배 이상 높은데, 이는 낮은 기온으로 난방에 따른 영향이 크기 때문이다(표 1). 그러나 강수량은 초미세먼지 농도를 감소시킬 수 있는 중요한 역할을 한다. 이 지역에서는 겨울철에 강수량이 여름철에 비해 5.4배 많았으며, 봄과 가을에 비해서도 2.8배와 1.9배 많았다.

표 1. 초미세먼지와 기상요소의 계절 특성

계절 (월)	초미세먼지 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	기온 ($^{\circ}\text{C}$)	풍속 (m/s)	강수량 (mm)
여름 (12~2)	6.0	14.8	4.0	83
가을 (3~5)	38.3	11.1	3.1	227
겨울 (6~8)	64.4	7.2	3.8	449
봄 (9~11)	21.4	10.7	3.7	157

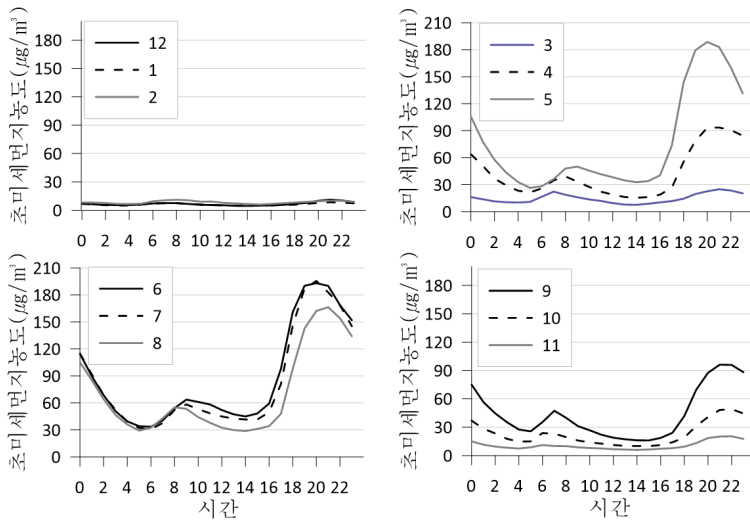
그림 6은 강수가 발생했을 때와 강수가 발생하지 않은 시기에 초미세먼지와 기상 특성을 나타낸 것이다. 초미세먼지는 6월에 강수가 없을 때 평균 $120\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 분포하였으며, 강수가 있을 때는 평균 $70\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 낮게 나타났다. 겨울철에 강수가 있으면 풍속도 빨라지고, 온도도 높아져서 초미세먼지의 확산이 잘 되며, 바이오매스 사용량도 감소하여서 대기에서 초미세먼지 농도 저감에 기여하는 것으로 평가되었다.

그림 6. 분석기간 동안 강수 발생 여부에 따른 월별
(a) 초미세먼지, (b) 풍속, (c) 상대습도, (d) 온도의 특성



계절에 따라 초미세먼지의 농도 분포 차이가 크기 때문에, 계절별로 초미세먼지의 일변화 특성을 그림 7에 나타내었다. 11월부터 이듬해 2월까지 월평균 농도는 대부분 시간대에서 세계보건기구의 24시간 환경기준인 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 분포하였다. 그러나 4월부터 9월까지는 대부분 시간대에서 세계보건기구의 24시간 환경기준을 초과하였으며, 야간시간대의 월평균 농도는 $92\sim 185\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 측정되었다.

그림 7. 분석기간 동안 대상지역의 계절별 초미세먼지 일변화 농도 분포



풍속과 강수량 그리고 온도는 예보제와 대기환경지수가 악화할수록 감소하는 특성을 보였다(표 2). 반면 기온이 감소함에 따라 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 비율은 증가하였고, 이것은 날씨가 추워질 때, 바이오매스 사용도 증가하는 것을 의미한다.

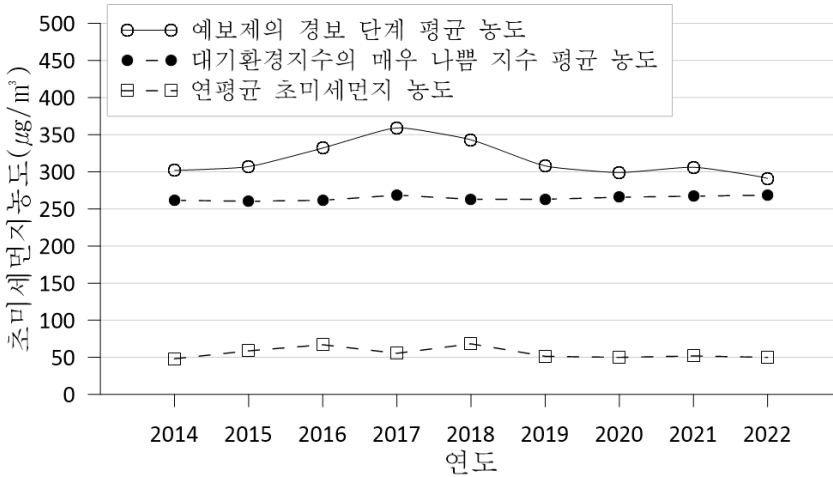
표 2 예보제와 대기환경지수의 단계별 기상과 미세먼지 비율(PM2.5/PM10) 특성

환경지표	단계	풍속(m/s)	강수량(mm)	온도(℃)	PM2.5/PM10
예보제	좋음	1.8	833.0	12.4	0.571
	주의	0.8	30.3	7.3	0.886
	예비경고	0.7	39.5	6.8	0.893
	경고	0.5	16.6	6.2	0.921
대기환경 지수	좋음	2.0	284.4	14.9	0.382
	보통	1.8	326.1	10.9	0.696
	민감군에 나쁨	1.5	133.3	8.8	0.830
	나쁨	0.9	153.0	7.5	0.877
	매우나쁨	0.6	19.3	6.5	0.906
	위험	0.4	3.3	6.0	0.926

5. 장기간 초미세먼지의 변화

이 지역을 포함한 칠레 중남부 지역에서는 바이오매스 연소로 인해 많은 양의 초미세먼지가 발생하기 때문에, 대기질 개선을 위해서는 바이오매스 사용을 줄이는 것이 중요하다(de Arruda Moreira et al., 2020, pp. 15-16). Molina et al(2017)의 연구에서는 칠레 중남부의 여러 도시에서 장기간 초미세먼지 농도가 감소하였고(p. 660), 장유운(2021)의 연구에서도 칠레 남쪽에 있는 꼬이 아이께(Coyhaique) 지역의 경우 통계적으로 유의한 감소(p value<0.001)가 있는 것으로 알려졌다(p. 129). 그러나 본 연구에서는 분석기간 동안 타일센(Theilsen) 회귀분석을 통한 초미세먼지의 장기간 특성은 통계적으로 유의한 농도 변화는 없는 것(p value>0.05)으로 평가되었다.

그림 8. 분석기간 동안 초미세먼지의 연간 변화 특성



이 지역에서 초미세먼지 농도가 환경지수와 예보제의 고농도로 분포하는 단계 사례에서도 통계적으로 유의한 개선은 없이 여전히 고농도의 초미세먼지가 지속적으로 관측되었다(그림 8).

Blanco et al.(2022)은 코로나19 시기에 이 지역을 대상으로 공간 분석 결과로 이 지역에서는 빈곤율이 높아서 바이오매스로 인한 초미세먼지 농도가 높은 것으로 평가하였다(p. 9). Torres et al. (2021)은 칠레 정부의 초미세먼지 정책이 초미세먼지 감소에 기여하고 있지만, 바이오매스 연소와 관련된 배출은 더 강력한 정책의 필요성을 제시하고 있다(p. 15). 그리고 대체에너지를 사용함으로써 초미세먼지 농도의 감소를 기대할 수 있다(Lala et al., 2023, pp. 11-12). 또한, 인구가 10만명에 이르고 이 지역보다 위도가 낮은 칠레 남부에 위치한 뽀타아레나스(Punta Arenas) 지역의 초미세먼지 농도는 2014년~2022년 동안 연평균 $4.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 빠드레라스까사스 지역에 비해 9.3배 낮아서 매우 청정한 대기질을 유지하고 있다. 이 지역과 뽀타아레나스 지역의 가장 큰 차이점은 사용하는 연료의 종류에 기인한다. 뽀타아레나스 지역은 난방용 연료가 주로 천연가스로, 이것이 이 지역과 뽀타아레나스 지역의 대기질 수준의 큰 차이를 발생시키고 있다.

이 지역의 초미세먼지 농도를 환경기준 수준으로 개선하기 위해서는 강화

된 환경 정책을 수립하고 재생에너지 사용을 확대하면서 바이오매스 연소를 줄이는 등 다양한 방안의 필요성이 제기된다.

IV. 결론

칠레 빠드레라스까사스 지역은 겨울철 바이오매스 연소로 인하여 고농도 초미세먼지 농도가 지속적으로 관측되는 지역이지만, 오랜 시간 동안 시민들의 건강에 관한 연구는 지역의 병원 자료가 공개되지 않아서 이루어지지 못했다. 본 연구에서는 초미세먼지가 인체에 영향을 끼치게 되는 환경기준 농도와 사람의 신체에 영향을 끼치는 정도를 지수화한 대기환경지수를 활용하여 이 지역에서 시민들에게 영향을 끼칠 수 있는 고농도의 초미세먼지 특성을 연구하였다.

대기환경지수는 심장질환자와 호흡기 질환자 그리고 어린이와 노약자들이 야외활동을 자제하거나 즉각 중단 해야 하는 상황을 알려주기 때문에 이 지역에서 발생하는 대기오염지수의 특성을 이해하면 시민들의 건강에 끼치는 영향을 간접적으로 이해할 수 있다.

분석기간 동안 이 지역의 연평균 초미세먼지 농도는 $41\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 칠레 정부의 연평균 환경기준보다 2배 높았고, 세계보건기구의 기준보다 8배 높게 평가되었다. 대기환경지수에서 민감군에 나뉘는 이상의 단계에서는 연평균 27.1%가 발생하였다. 특히 시민들의 활동에 도움을 주기위한 예보제를 적용할 경우 5월부터 9월까지 가장 높은 단계인 경고 수준의 고농도가 5월부터 9월까지 매월 평균 15일 이상 관측되었다.

이 지역에서 겨울철 강수량이 높기 때문에 초미세먼지 농도는 강수량이 많은 시기에 강수가 없을 때보다 평균 $70\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 감소하였다. 강수량이 없을 때는 기온이 낮아져서 바이오매스 연소가 증가하고, 풍속이 약해지면서 초미세먼지의 대기 축적이 증가하여 고농도 초미세먼지가 발생한다. 이 지역에서 겨울철 강수량이 높기 때문에 초미세먼지 농도는 강수가 없을 때보다 평균 $70\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 감소 하였다.

칠레의 24시간 환경기준을 초과하는 사례와 주의 이상의 예보단계가 여전히 빈번하게 발생하고 연평균 대기환경지수가 나쁨 단계로 평가되고 있다. 분석기간 동안 이 지역의 장기간 초미세먼지 농도의 변화 특성은 통계적으로 유의하지 않은 것으로 평가되었다. 이것은 이 지역에 대한 칠레 정부의 오래된 스토브 교체, 규격화된 바이오매스 연료 사용, 교육 강화와 같은 초미세먼지 정책에 대한 개선이 필요함을 의미한다.

초미세먼지를 칠레 정부의 환경기준에 부합하도록 하기 위해서는 현재 정책 외에 천연가스 또는 재생에너지 발전량 확대를 통한 바이오 연료 사용 저감을 위한 추가 정책 도입이 필요하다.

참고문헌

- 장유운 (2022). 칠레 코이아이끼시의 고농도 초미세먼지의 특성 연구. *중남미 연구* 41(3), 129-153, DOI : 10.17855/jlas.2022.8.41.3.129
- Aguilera, R., Corringham, T., & Gershunov, A. (2021). Wildfire smoke impacts respiratory health more than fine particles from other sources: observational evidence from Southern California. *Nat Commun.*, 12, <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21708-0>
- Blanco, E., Rubilar, F., Quinteros, M. E., Cayupi, K., Ayala, S., Lu, S., Jimenez, R. B., Cárdenas, J. B., Blazquez, C. A., Delgado-Saborit, J. M., Harrison, R. M., & Ruiz-Rudolph, P. (2022). Spatial distribution of particulate matter on winter nights in Temuco, Chile: Studying the impact of residential wood-burning using mobile monitoring. *Atmospheric Environment*, 286, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119255>.
- Boso, À., Martínez, A., & Somos, M. (2022). No Country for Old Men. Assessing Socio-Spatial Relationships Between Air Quality Perceptions and Exposures in Southern Chile. *Appl. Spatial Analysis*, 15, 1219-1236, <https://doi.org/10.1007/s12061-022-09446-2>
- Brito, J., Bernardo, A., & Gonçalves, L. L. (2022). Atmospheric pollution and mortality in Portugal: Quantitative assessment of the environmental burden of disease using the AirQ+ model. *Science of The Total Environment*, 815, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.152964>.
- Cubillos, J. C., & Blazquez, C. (2021). *Prospective and trends in technology and skills for sustainable social development: “Leveraging emerging technologies to construct the future”*. The 19th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology, USA
- de Arruda Moreira G, da Silva Andrade I, Cacheffo A, da Silva Lopes F. J., Calzavara Yoshida A, Gomes A. A., da Silva J. J., & Landulfo E. (2021).

- Influence of a Biomass-Burning Event in PM_{2.5} Concentration and Air Quality: A Case Study in the Metropolitan Area of São Paulo. *Sensors*, 9, doi: 10.3390/s21020425
- EPA (2018). Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality-the Air Quality Index(AQI).
- Jorquera, H. (2021). Air quality management in Chile: Effectiveness of PM_{2.5} regulations. *Urban Climate*, 35, <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100764>
- Kansiime, W. K., Mugambe, R. K., & Atusingwize, E. (2022). Use of biomass fuels predicts indoor particulate matter and carbon monoxide concentrations; evidence from an informal urban settlement in Fort Portal city, Uganda. *BMC Public Health*, 22, <https://doi.org/10.1186/s12889-022-14015-w>
- Lala, M. A., Onwunzo, C. S., Adesina, O. A., & Sonibare, J. A. (2023). Particulate matters pollution in selected areas of Nigeria: Spatial analysis and risk assessment. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 7, <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100288>.
- Langner, J., Gidhagen, L., Bergström, R., Gramsch, E., Oyola, P., Reyes, F., Segersson, D. & Aguilera, C. (2020). Model Simulated Source Contributions to PM_{2.5} in Santiago and in the Central Region of Chile. *Aerosol Air Qual. Res.*, 20, <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.08.0374>
- Molina, C., Manzano, C. A., Toro A, R., & Leiva G, M. A. (2023). The oxidative potential of airborne particulate matter in two urban areas of Chile: More than meets the eye. *Environment International*, 173, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.107866>.
- Molina, C., Toro A, R., Morales S, R. G., Manzano, C. A., & Leiva-Guzmán, M. A. (2017). Particulate matter in urban areas of south-central Chile exceeds air quality standards. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 10, 653-667.
- Ruiz-Tagle, J. C., & Schueftan, A. (2019). Reducing Air Pollution through Behavioral Change of Wood-Stove Users: Evidence from an RCT in

- Valdivia, Chile. *IDB*,
<https://publications.iadb.org/en/reducing-air-pollution-through-behavioral-change-wood-stove-users-evidence-rct-valdivia-chile>
- Soleimanian, E., Mousavi, A., Borgini, A., De Marco, C., Ruprecht, A. A., & Sioutas, C. (2021). Investigation of PM_{2.5} oxidative potential in the Milan metropolitan area: Impacts of biomass burning emissions, *European Respiratory Journal*, 58, DOI: 10.1183/13993003.congress-2021.PA1780
- Torres, R., Baker, N., Bernal, G., Peres, F., Maldonado, A. F., & Caceres, D. D. (2021). The effect of short-term of fine particles on daily respiratory emergency in cities contaminated with wood smoke, *Global Journal of Environmental Science and Management*, 7, 15-32.
- Urrutia-Pereira, M., Rizzo, L. V, Chong-Neto, & H. J, Solé, D. (2021). Impact of exposure to smoke from biomass burning in the Amazon rain forest on human health. *J Bras Pneumol.*, 15, doi: 10.36416/1806-3756/e20210219.
- Villalobos, A. M., Barraza, F., Jorquera, H., & Schauer, J. J. (2017). Wood burning pollution in southern Chile: PM_{2.5} source apportionment using CMB and molecular markers, *Environmental Pollution*, 225, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.02.069>.
- Weichenthal, S., Kulka, R., Lavigne, E., van Rijswijk, D., Brauer, M., Villeneuve, P. J., Stieb, D., Joseph, L., & Burnett, R. T. (2017). Biomass Burning as a Source of Ambient Fine Particulate Air Pollution and Acute Myocardial Infarction. *Epidemiology*, 28, DOI: 10.1097/EDE.0000000000000636
- WHO (2021), WHO global air quality guidelines,
<https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
- Xing, L., Bei, N., Guo, J., Wang, Q., Liu, S., Han, Y., Pongpiachan, S., & Li, G. (2021). Impacts of Biomass Burning in Peninsular Southeast Asia on PM_{2.5} Concentration and Ozone Formation in Southern China During Springtime—A Case Study. *JGR Atmospheres*, 126,
<https://doi.org/10.1029/2021JD034908>

Yap, P. S., & Garcia C. (2015). Effectiveness of residential wood-burning regulation on decreasing particulate matter levels and hospitalizations in the San Joaquin Valley Air Basin. *Am J Public Health.*, 105, doi: 10.2105/AJPH.2014.302360.

■ 장유운

한국외국어대학교에서 환경학 박사학위(대기화학)를 취득하였으며, 현재 한국외국어대학교 중남미연구소에서 HK+ 교수로 재직 중이다.

(E-mail: glarecloud@daum.net)

Study on Characteristics of Fine Particulate Matter Using Air Quality Index in Padre las Casas, Chile

Jang, Yu Woon
(Hankuk University of Foreign Studies)

The purpose of this study is to understand the characteristics of fine particulate matter generated by biomass combustion in the Padre las Casas area of central-southern Chile, using environmental standards and air quality index. The analysis was based on hourly observations from March 2013 to December 2022, collected by the Chilean Ministry of Environment. Environmental standards were applied based on the 24-hour and annual limits established by the World Health Organization and the Chilean government. The annual average concentration of fine particulate matter in this area was $41\mu\text{g}/\text{m}^3$, which was eight times higher than the WHO guideline and twice as high as the Chilean government's standards. During the analysis period, there was no statistically significant long-term change in the concentration of fine particulate matter ($p\text{ value} > 0.05$). However, the annual air quality index in this area was evaluated as being in the "bad" level for a long time, indicating the need for a reduction in the amount of fine particulate matter emitted. This implies the need for additional policies to reduce the use of biomass by expanding the use of natural gas or renewable energy sources.

Key Words

Padre Las Casas, Fine particulate matter, Biomass combustion, Environmental standards, Air quality index

논문 접수일 : 2023년 5월 02일

심사 완료일 : 2023년 5월 20일

게재 확정일 : 2023년 5월 23일