

칠레의 코이아이께 지역에서 건강 관련 환경 지표를 활용한 초미세먼지 특성 연구*

장유운

한국외국어대학교

장유운(2023), 칠레의 코이아이께 지역에서 건강 관련 환경 지표를 활용한 초미세먼지 특성 연구, 이베로아메리카연구, 34(1), 145-165.

초록 본 연구의 목적은 칠레 남부지역에 위치한 코이아이께 지역에서 세 가지 환경지표인 환경 기준, 예보제 그리고 대기환경지수(AQI)를 적용하여 초미세먼지의 특성을 평가하는 것이다. 본 연구에서는 코이아이께 지역의 2013년 9월부터 2022년 12월까지 시간 단위로 측정된 초미세먼지 자료와 2017년 1월부터 2022년 12월까지 칠레 기상청에서 제공하는 기상자료(풍속, 풍향, 습도, 기온, 강수량)를 분석하였다. 24시간 환경기준 초과 사례와 예보 수준의 고농도 사례 그리고 대기환경지수의 악화는 강수량이 적고, 풍속이 약하고, 기온이 낮은 겨울철(6월~8월)에 바이오매스 사용으로 가장 많이 발생하였다. 분석기간 동안 초미세먼지는 통계적으로 유의미하게 감소하였지만, 대기환경지수의 가장 높은 단계인 위험에 해당하는 고농도 초미세먼지의 경우는 유의미한 변화는 없었다. 연평균 초미세먼지도 칠레 정부와 세계보건기구의 환경기준을 2.4배와 9.8배 초과하였다. 이 지역에서 평가된 비정상적인 환경지표는 겨울철 난방용 바이오매스 사용을 줄일 수 있는 시급한 정책의 필요성을 의미한다.

핵심어 코이아이께, 초미세먼지, 바이오매스, 예보제, 대기환경지수

* 이 논문은 2019년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원(NRF-2019S1A6A3A0205 8027)과 2023학년도 한국외국어대학교 교원연구지원사업 지원에 의하여 이루어진 연구임.

I. 서론

코이아이께(Coyhaique)는 아이센주(Aysén)의 주도로, 칠레 남부에 위치하며 약 50,000명의 인구가 거주하고 있다. 이 도시는 심슨(Simson) 강과 코이아이께(Coyhaique) 강으로 둘러싸여 있으며, 남위 45도에 위치하여 만년설의 산악 지형이 주변을 이루고 있다. 주민들은 겨울철에 난방을 위해 바이오매스(나무)를 연료로 사용한다(Molina *et al.*, 2017, 664; OECD, 2014, 49-50). 바이오매스 연료 사용으로 인해 발생하는 초미세먼지는 자동차나 산업 활동에서 발생하는 초미세먼지보다 더 해롭다고 알려져 있다(Orru *et al.*, 2022, 1). 산티아고 시에서는 약 50%의 가정에서 바이오매스를 사용하지만, 코이아이께에서는 98%의 가정에서 바이오매스를 사용하고 있어서, 코이아이께에서 초미세먼지 농도가 더 심각한 상황이다(Gómez *et al.*, 2017, 1). 이러한 문제에 대해 유럽과 캐나다에서는 목재 난방으로 인한 초미세먼지를 해결하기 위해 가스로 연료를 전환하거나 에너지 효율이 높은 스토브로 교체하는 프로그램을 시행하였다(Orru *et al.*, 2022, 9).

대기질 개선을 위해 칠레 정부는 2010년부터 가정의 에너지 효율 향상, 열 시스템 개선, 연료 개선 및 교육 프로그램을 시행하며, 오염물질을 덜 배출하는 스토브로의 교체 정책을 폈다. 그러나 스토브 교체 지원에 참여하는 가정을 분석한 결과, 경제적으로 어려운 가정일수록 참여율이 낮았다는 문제가 발생했다. 또한 일부 가정에서는 더 많은 열을 발생시키는 스토브를 선호하거나, 공기 주입구를 최소한으로 작동시키는 가정에서는 많은 양의 오염물질이 배출되는 문제가 발생했다(Gómez *et al.*, 2017, 4-6). Schueftan *et al.*(2016, 32-34)은 에너지 효율을 높이기 위해 단열을 강화하는 방법을 제안하며, 이로 인해 목재 사용을 줄여 초미세먼지 배출량을 감소시킬 수 있다고 제안했다. 그러나 에너지 효과를 극대화하기 위한 단열 공정은 에너지 빈곤과 같은 경제·사회적 복잡성을 고려하면 실행에 어려움이 따른다.

코이아이께에서는 고농도 초미세먼지를 예측하기 위한 신경망 모델 연구(Prez *et al.*, 2020, 1-9)와 기상요소에 따른 초미세먼지의 특성에 관한 연구가 진

행되었다(장유운, 2022, 135). Solís *et al.*(2022, 12)은 장기간 관측자료 분석에서 PM2.5 수준이 개선되는 특성을 제시하였으며, 이는 코이아이끼의 대기질 정책에 따른 것으로 분석하였다. 초미세먼지는 장기적으로 또는 단기적으로 시민들의 호흡기와 뇌혈관 질환에 영향을 끼치게 되어서 조기사망자를 발생시킬 수 있다(Li *et al.*, 2022a, 6). 특히 어린이와 65세 이상 시민들에게 더 큰 피해를 발생시킨다. 또한 건강이 악화된 사람들의 치료에도 부정적인 영향을 끼칠 수 있다(Jin *et al.*, 2022, 5-8; Li *et al.*, 2022b, 9-11; Lim *et al.*, 2020, 6-7; Merk *et al.*, 2020, 10-13).

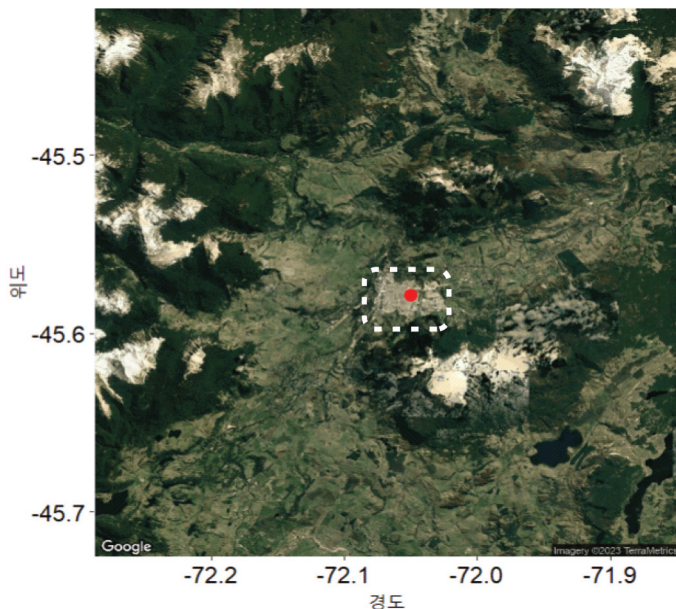
코이아이끼는 2013년부터 대기자동측정소를 운영하여 초미세먼지를 관측하고 있지만, 코이아이끼와 같이 작은 도시나 빈곤 지역에서는 호흡기나 심장 질환 같은 병원 기록이 제공되지 않기 때문에 초미세먼지와 관련된 직접적인 건강 관련 연구 사례는 부족한 실정이다(Sharma *et al.*, 2022, 345; Torres *et al.*, 2021, 15-16).

본 연구에서는 건강에 피해를 줄 수 있는 최소 기준인 세계보건기구와 칠레 정부의 초미세먼지 환경 기준, 칠레 정부에서 환경 비상 수준을 정의한 예보제, 미국 환경청에서 대기오염물질에 따른 인체 위해성을 반영해 개발한 대기환경 지수를 이용하여 시민들의 건강에 영향을 끼칠 수 있는 초미세먼지의 특성을 연구하였다.

II. 코이아이끼 지역의 관측자료와 분석 방법

1. 초미세먼지 관측자료

코이아이끼시는 해발 300m에 위치하고 있으며, 주변은 1,000~1,600m의 산악지형으로 분지를 이루고 있다(그림 1). 본 연구에서는 칠레 환경부 싱카(SINCA, <https://sinca.mma.gob.cl/>)에서 제공하는 미세먼지(PM10, PM2.5) 자료를 기반으로, 코이아이끼의 대기질을 분석하였다. 분석 대상 측정소인 코이아이끼 측정소는 미세먼지(PM10, PM2.5)와 일산화탄소, 이산화황 등을 측



〈그림 1〉 코이아이께 지역의 위치(사각형 점선)와 대기자동측정소 위치(원)

정하고 있다. 본 연구에 사용된 초미세먼지(PM_{2.5}) 자료는 칠레 환경부에서 시간 단위로 측정한 자료로, 검증 전 자료, 검증 완료 자료, 검증 인증 자료로 3단계로 구분되어 있다. 본 연구에서는 최종 단계의 검증 인증 자료를 사용하여 분석을 진행하였으며, 분석 기간은 2013년 9월부터 2022년 12월까지의 자료를 활용하였다.

2. 기상 자료

이 연구에서는 대기오염물질이 기상조건에 영향을 받아 생성 및 확산하기 때문에, 칠레 기상청에서 제공하는 시간별 풍속, 풍향, 온도, 습도와 6시간 간격으로 관측된 강수량 자료를 사용하여 분석에 활용했다(<https://climatologia.meteochile.gob.cl/>). 칠레 기상청은 1950년부터 기상자료를 제공하고 있으나, 2013년부터 2016년까지는 13시부터 23시까지 자료만 제공되기 때문에 이 연

구에서는 24시간 기상자료가 제공된 2017년부터 2022년까지의 기간만을 이용했다.

3. 자료 분석

칠레 환경부에서 제공하는 초미세먼지 자료와 칠레 기상청에서 제공하는 기상자료는 R 프로그램을 이용하여 데이터 전처리와 연간·월간 통계량을 산정하였다(<https://www.r-project.org/>). 그리고 장기간 초미세먼지의 경향성에 대한 통계적 유의성 분석에는 R 프로그램에 내장된 Theilsen 함수를 사용하였다.

4. 환경 지표

본 연구에서 건강과 관련된 환경지표로 환경기준, 예보제, 대기환경지수(Air Quality Index, AQI)를 이용하였다. 환경기준은 칠레 정부와 세계보건기구(WHO)의 초미세먼지 환경기준을 적용하였다. 초미세먼지 예보제는 초미세먼지 농도 범위에 따라 좋음($0\sim79\mu\text{g}/\text{m}^3$), 주의($80\sim109\mu\text{g}/\text{m}^3$), 예비경고($110\sim169\mu\text{g}/\text{m}^3$), 경고($170\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상)로 4단계로 구성되어 있다(MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE, 2021, 5). 대기환경지수는 초미세먼지 농도를 환경지수로 환산하여 적용하였다. 대기환경지수는 환산된 환경지수에 따라 좋음(0-50), 보통(51-100), 민감군에 나쁨(101-150), 나쁨(151-200), 매우나쁨(201-300), 위험(301 이상)으로 6단계로 구분되어 있다(EPA, 2018)

III. 연구 결과

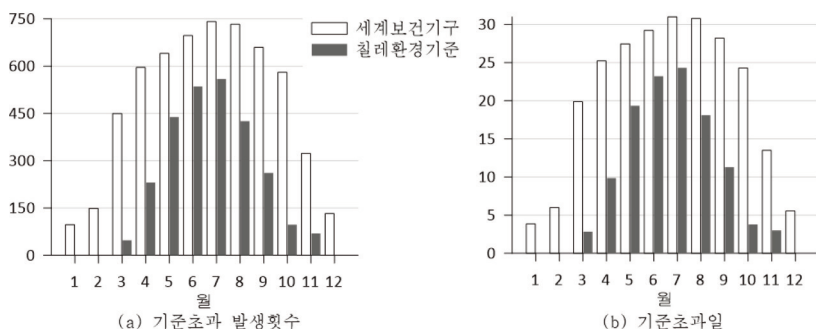
1. 코이아이게 지역에서 환경기준, 예보제 그리고 대기환경지수에 따른 초미세먼지 특성

1) 환경기준을 초과하여 건강에 해로운 농도 발생횟수와 발생일 평가

세계보건기구는 초미세먼지에 대한 환경기준을 24시간 평균 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 제한을 두었으며 연평균으로는 $5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 제한을 두고 있다. 그러나 초미세먼지가 건강에 미치는 환경기준은 해당 국가의 환경에 따라 세계보건기구보다

는 완화된 기준을 설정하고 있다. 칠레는 24시간 평균과 연평균 기준으로 각각 50과 $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 제한을 두고 있다. 코이아이계에서 초미세먼지는 계절에 따라 24시간 평균 기준의 초과 발생횟수와 발생일의 차이가 큰 것으로 나타났다(그림 2).

분석기간 동안 칠레 정부의 24시간 평균 기준을 초과한 사례는 연평균 2,517회였다. 그리고 코이아이계 시민들은 초미세먼지가 24시간 평균 환경 기준을 초과한 날을 1년에 평균 108일 겪는 것으로 분석되었다. 특히 4월부터 9월까지 는 매월 10일 이상 환경기준을 초과하였다.



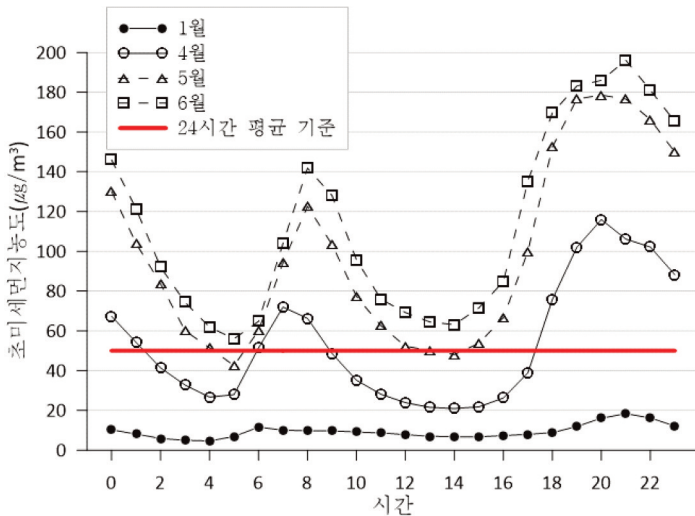
〈그림 2〉 2013~2021년 동안 초미세먼지의 세계보건기구와 칠레 24시간 환경기준에 대한 연간 평균 기준초과 (a)발생횟수와 (b)기준초과일

그림 3은 코이아이계에서 칠레의 24시간 초미세먼지 환경 기준을 초과한 발생횟수와 발생일의 차이를 보이는 4개월(1월, 4월, 5월, 6월)의 시간별 특성을 나타낸 것이다. 1월의 경우는 모든 시간대의 평균 초미세먼지는 24시간 기준 이하로 분포하였다. 24시간 기준을 평균 10일 초과한 4월의 시간별 분포는 아침과 야간 시간대에는 24시간 환경기준보다 높은 농도로 분포하였다. 그리고 15일 이상 24시간 환경기준을 초과한 5월과 6월에는 대부분 시간대에서 초미세먼지 평균 농도가 기준을 초과하는 것으로 평가되었다.

월별 초미세먼지의 시간 변화에서 세계보건기구의 24시간 환경기준을 적용하면, 여름인 1월을 제외하고 4월, 5월, 6월의 평균 농도가 24시간 환경기준인

15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하였다. 그리고 연간 초과횟수는 연평균 5,662회 환경기준을 초과하였고, 연평균 초과일도 238일이었다.

분석기간 동안 코이아이끼에서 초미세먼지의 연평균 농도는 48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 이것은 칠레 정부와 세계보건기구의 연평균 환경 기준을 2.4배와 9.8배 초과한 농도에 해당한다.



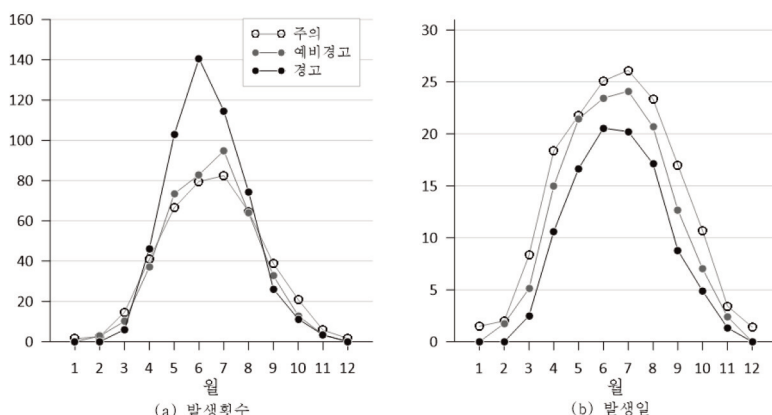
〈그림 3〉 분석기간 동안 시간에 따른 월평균 초미세먼지 특성

2) 초미세먼지 예보제

칠레 정부와 세계보건기구의 24시간 환경기준과 연평균 환경기준 결과에 따르면 코이아이끼의 초미세먼지 오염은 매우 심각한 수준으로 평가되었다. 세계보건기구 자료에서도 코이아이끼는 남미지역에서 초미세먼지 오염이 가장 심각한 도시로 조사되었다. 최근 초미세먼지 농도가 다른 시기에 비해 낮은 3월도 코이아이끼의 초미세먼지 농도가 칠레에서 가장 높게 관측되었다. 칠레 정부는 초미세먼지가 심각할 경우 시민들의 야외 활동 자제와 난방기구 사용 제한 조치를 하기 위해서 초미세먼지 예보제를 시행하고 있다(John, 2019).

코이아이끼에서 초미세먼지 측정 자료 중 주의 이상의 고농도 발생 사례는

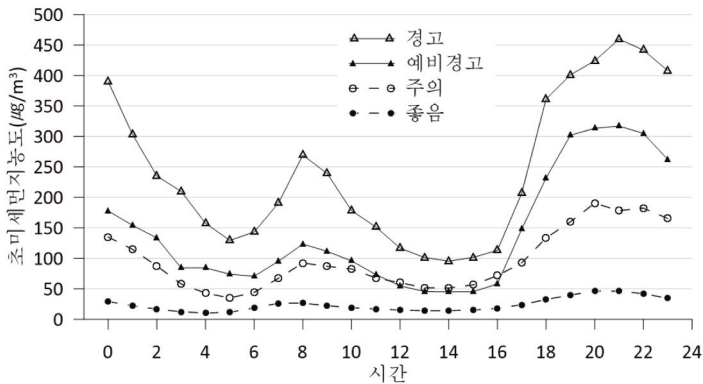
연평균 1,334회로 관측되었다. 그리고 예보제의 최고 단계인 경고에 해당하는 사례는 연평균 411회 관측되었다. 월별 예보에서 주의에 해당하는 사례는 1년 내내 발생하였지만, 예비경고에 해당하는 사례는 1월과 12월에는 발생하지 않았고, 경고에 해당하는 농도는 3월에서 11월까지 9개월 동안 발생했다(그림 4). 그리고 경고에 해당하는 고농도 초미세먼지가 5월에서 8월까지 4개월 동안 가장 많이 발생하였지만, 발생일은 경고 단계가 가장 적었다. 이것은 5월에서 8월까지 하루 동안 경고에 해당하는 $170\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 고농도가 가장 많이 측정되었다는 것을 의미하며, 이 기간에 매월 평균 15일 이상 발생하였다. 칠레의 겨울에 해당하는 6~8월까지 3달 동안 경고에 해당하는 고농도 사례는 월평균 17.3일이었다.



〈그림 4〉 분석기간 동안 예보제에 따른 초미세먼지 (a)발생횟수와 (b)발생일

시민들의 활동 시간과 관련한 초미세먼지의 특성을 알아보기 위하여 시간별 초미세먼지 농도를 분석했다(그림 5). 칠레 예보제의 종음을 포함한 모든 단계에서 출근시간과 야간에 최대 농도가 발생했으며, 종음을 제외하고 주의, 예비경고, 경고에 해당하는 농도에 대한 시간별 자료는 대부분 칠레 정부의 환경기준(24시간 평균 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$)을 초과했다. 경고 단계에 해당하는 농도는 모든 시간대에서 칠레 환경기준보다 2배 이상 높았으며, 세계보건기구의 24시간 환경

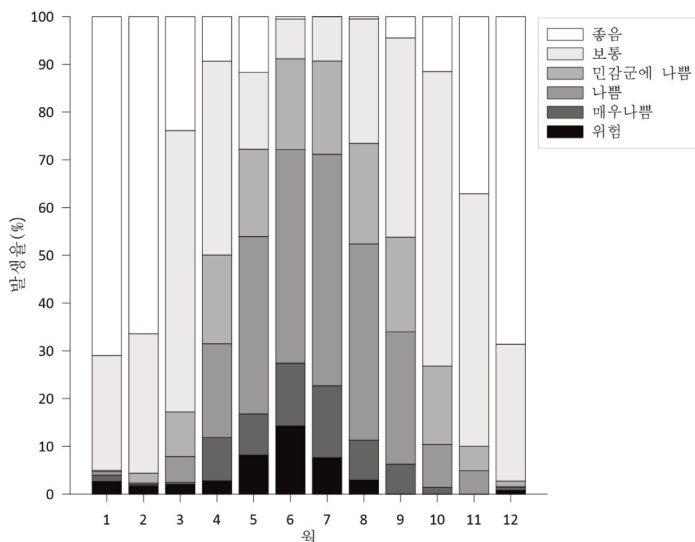
기준에 비해 6.6배 높았다. 칠레는 주택의 단열효과가 크지 않아서, 실외 고농도 초미세먼지가 실내 초미세먼지 농도에 영향을 줄 수 있다(Molnár *et al.*, 2005, 2643; Schueftan *et al.*, 2016, 32-34). 따라서 코이아이계에서 시민들의 건강을 위해서는 겨울철 초미세먼지 농도가 환경기준 수준까지 개선되어야 한다. 유럽연합은 2005년부터 2020년까지 대기질 개선을 통해 조기사망자 수를 45% 감소시켰다(European Environment Agency, 2022). 이러한 대기질 개선에는 가정용 난방 개선도 포함되었다. 코이아이계에서도 겨울철 난방용 바이오매스 감축을 이룬다면 시민들의 건강에 기여할 것으로 기대된다.



〈그림 5〉 초미세먼지 예보단계별 평균 일간 농도 변화(2020~2022년)

3) 대기환경지수(AQI)

코이아이계에서 경고 단계의 고농도 사례가 매년 겨울철에 가장 많이 발생한다는 것은 이 기간에 도시 시민들의 호흡기와 심장질환에 큰 위협을 끼칠 수 있다. 도시의 공기 오염도를 건강과 연관 지어 평가하는 지표인 대기환경지수의 경우 늦봄(10월, 11월)과 여름(12월, 1월, 2월) 그리고 초가을(3월)에는 좋음과 보통의 대기질이 70% 이상이었으며, 특히 여름에는 95% 이상 좋음과 보통의 대기질로 분석되었다. 민감군에 나쁨 이상에 대한 월평균 발생율은 4월부터 9월까지 50% 이상 발생하였으며, 6월과 7월에는 월평균 90% 이상이었다(그림 6).



〈그림 6〉 분석기간 동안 대기환경지수에 따른 월별 발생률

2. 초미세먼지 분포에 영향을 주는 기상 특성

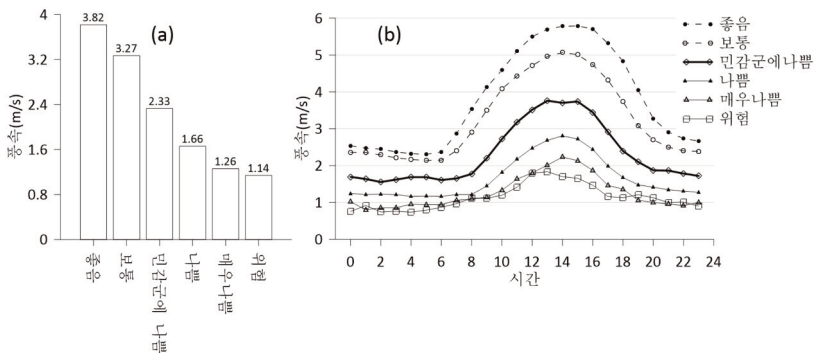
1) 초미세먼지 증가에 기여하는 기온과 풍속

코이아이게에서 초미세먼지가 높게 관측되는 것은 기상적 영향이 크고(장유운, 2022, 135), 겨울철 난방을 위하여 주로 나무 목재(biomass)를 열원으로 사용하고 있기 때문이다. 여름에는 월평균 기온이 13.4°C로 난방이 필요하지 않아서 초미세먼지는 평균 8.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 청정한 수준이었다(표 1). 그러나 6월부터 평균온도가 3°C 이하가 되면서 나무 목재 연료 사용 증가로 초미세먼지는 여름철보다 12.7배 증가하였다.

초미세먼지가 겨울철에 높게 발생하는 것은 온도 이외에 풍속도 연관성이 있었다. 풍속이 빠를수록 대기의 오염물질 확산에 유리하지만, 초미세먼지가 높았던 시기(5월~7월)는 여름철보다 2.1배 낮았다. 대기환경지수에 따른 풍속에서도, 좋음 지수에서보다 매우나쁨 지수와 위험 지수에서 각각 3배와 3.3배 낮게 관측되었다(그림 7a). 대기환경지수에 따른 시간별 풍속도 좋음과 보통 지수에서는 모든 시간대에서 평균 2m/s 이상이었지만, 위험 지수에서는 모든

〈표 1〉 코이아이계에서 분석기간 동안 월간 평균 초미세먼지와 기상특성

월	초미세먼지($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	기온($^{\circ}\text{C}$)	풍속(m/s)	강수량(mm)
1	9.5	13.2	3.9	48.9
2	11.0	14.0	3.3	36.6
3	22.8	11.6	2.8	55.9
4	54.0	8.5	2.2	92.2
5	98.8	5.5	1.8	132.8
6	113.8	2.7	1.7	126.5
7	97.9	2.6	1.8	118.3
8	73.6	4.6	2.4	129.0
9	51.5	6.2	2.8	60.7
10	29.1	8.4	3.2	46.2
11	16.6	11.1	3.6	53.4
12	10.6	12.9	4.0	44.4



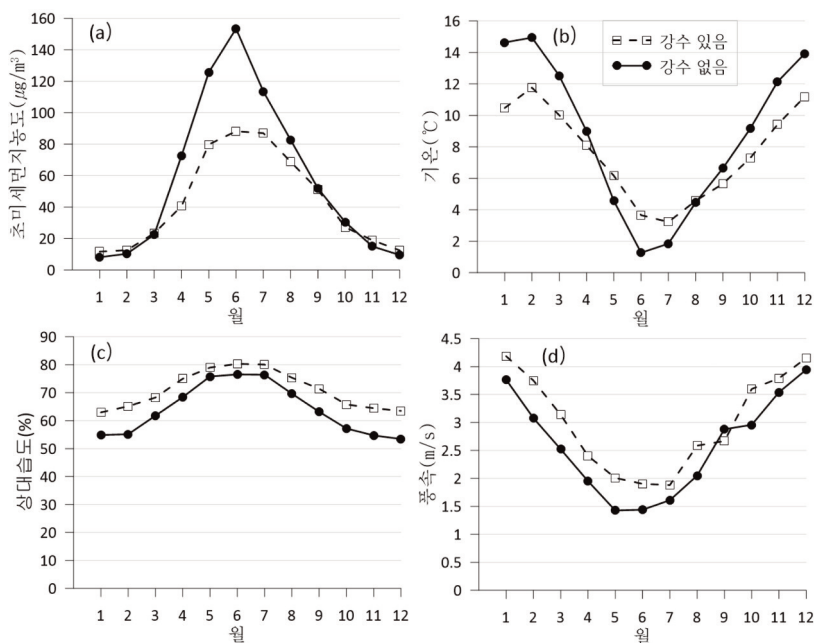
〈그림 7〉 분석기간 동안 (a) 대기환경지수에 따른 풍속과 (b) 풍속의 일변화

시간대에서 평균 2m/s보다 낮은 풍속으로 분포하여서 대기 정체로 인하여 고농도 초미세먼지가 발생하였다(그림 7b).

2) 초미세먼지 분포에 대한 강수량의 영향

강수량은 대기의 초미세먼지 제거에 중요한 역할을 한다(Liu *et al.*, 2020, 6). 코이아이계의 경우 월 강수량은 초미세먼지가 높게 분포하는 겨울철을 중심으로 많았다. 5월부터 8월까지 매월 평균 126mm의 강수량을 보였고, 여름에는

겨울보다 평균 2.9배 적은 강수량을 나타내었다. 그림 8은 강수량 발생 여부에 따른 월별 초미세먼지, 온도, 습도, 풍속의 차이를 분석한 것이다. 초미세먼지가 심각한 6월에 강수에 의해 초미세먼지는 $60\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이 감소하였다(그림 8a). 강수 여부에 따라 겨울철 초미세먼지 농도에 차이가 있는 것은 온도와 풍속도 초미세먼지 생성에 불리한 환경이 형성되었기 때문이다(그림 8b, 8d). Liu *et al.*(2020, 7)의 연구에서는 미세먼지 농도가 높을수록 강수에 의한 저감효과가 높았다. 코이아이계의 겨울철 동안 월별 강수일이 19.1일인 것을 감안하면, 강수 발생이 초미세먼지 저감에 중요한 역할을 하는 것으로 평가할 수 있다.



〈그림 8〉 강수 발생 여부에 따른 월별 (a) 초미세먼지, (b) 온도, (c) 상대습도, (d) 풍속의 특성

3. 코이아이계 지역에서 초미세먼지의 시간별 농도 특성과 장기간 특성 변화

분석기간 동안 초미세먼지 농도의 감소 정도를 평가하기 위해 장기간 경향성을 분석했다. 2013년 9월부터 2022년 12월까지 초미세먼지는 통계적으로 유

의한 수준에서 연평균 $1.78\mu\text{g}/\text{m}^3$ (최소 1.19, 최대 $2.5\mu\text{g}/\text{m}^3$)씩 감소하는 것으로 분석되었다.

칠레 예보제에 따른 초미세먼지의 장기간 변화량에서는 비상 단계의 농도를 제외하면, 예비경고와 경고 단계의 농도에서는 통계적으로 유의하게 감소했다(표 2). 칠레 정부의 예보제에서 경고는 $170\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이 기준이지만, 대기환경지수의 위험 지수는 $250\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이 하위 기준으로 초미세먼지가 고농도인 경우에는 통계적으로 유의한 변화가 없었다(표 2).

〈표 2〉 분석기간 동안 대기환경지수와 칠레 예보제에 따른 장기간 초미세먼지의 Theilsen 분석을 통한 경향성 분석

대기환경지수	초미세먼지 농도 ($\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{year}$)	칠레예보제	초미세먼지 농도 ($\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{year}$)
좋음	-0.78*	좋음	-0.72*
보통	-0.85*	주의	-0.02
민감함	-0.71*	예비경고	-0.4*
나쁨	-3.04*	경고	-5.04*
매우 나쁨	-8.2*		
위험	2.89		

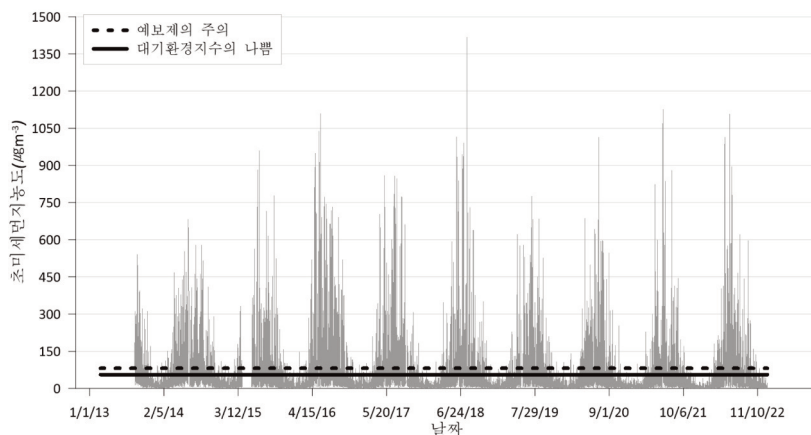
* 통계적으로 유의성이 있음($p\text{-value}<0.001$)

실제로 고농도에서 초미세먼지의 장기간 변화를 이해하기 위한 $300\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 자료에 대한 경향성 분석에서는 오히려 연간 $6.9\mu\text{g}/\text{m}^3$ 씩 초미세먼지가 통계적으로 유의하게 증가하는 경향을 나타내었다. Weichenth *et al.*(2017, 329)는 초미세먼지가 $5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가할 때 65세 이상에서 건강 위험성이 증가한다고 보고하였다.

1년 동안의 관측자료가 모두 있는 2014년과 2022년의 연평균 농도를 비교하면 연평균 초미세먼지는 $60.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 $41.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 31% 감소하였다. 그러나 예보제의 경고 이상 농도는 2014년 $260\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 2022년 $327\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 25.7% 증가하였고, 대기환경지수의 위험 이상의 고농도 초미세먼지의 비교에서도 2014년 $329\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 2022년 $409\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 24.3%가 증가하였다. 또한

300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 고농도 자료의 비교에서도 2014년 367 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 2022년 466 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 26.9% 증가하였다.

Solis *et al.*(2022, 1)은 정부의 저감정책에 따라 초미세먼지가 통계적으로 감소추세에 있다고 평가하였고, 본 연구에서도 전체 측정자료와 예보제의 주의 이상 단계와 대기환경지수에서 위험을 제외한 단계에서는 초미세먼지는 통계적으로 유의하게 감소추세를 나타내었다. 그러나 그림 9에서처럼 예보제의 주의와 대기환경지수의 나쁨 이상의 발생빈도(2022년, 13%와 21%)는 여전히 시민들의 건강에 영향을 끼치고 있는 수준이다. Guerrero *et al.*(2019, 743)은 습기가 많은 바이오매스 연료 사용으로 초미세먼지가 더 많이 발생할 수 있어서 연료 정책에 대한 개선 필요성을 제시하였다. 본 연구에서도 칠레 정부의 현재 초미세먼지 저감 정책인 오래된 스토브 교체, 주택 단열 강화, 바이오매스 습도 기준 적용(Reys *et al.*, 2019, 301)으로는 코이아이께 지역의 대기 개선을 기대하기 어려울 것으로 전망된다. 그러나 최근 연구에 따르면 초미세먼지와 관련한 에너지 배출원을 감소시키거나, 대체에너지로 전환하면 대기질이 개선될 수 있다(Malloux *et al.*, 2022, 11-13; Millstein *et al.*, 2018, 3; Ruan *et al.*, 2022, 6-8). 코이아이께 지역이 위치한 파타고니아는 풍력과 지열 자원이 풍부한 것으로



〈그림 9〉 분석기간 동안 초미세먼지의 시계열 분포

알려져 있다(Aravena, 2016, 3-5; energiE, 2022, 43; Maripangui *et al.*, 2016, 2-4). 따라서 이 지역에서 초미세먼지를 저감하기 위해서는 풍부한 자연에너지를 활용하는 방법을 도입하여 난방용 바이오매스의 사용을 감소시킬 수 있는 정책 개선이 필요할 것으로 사료된다.

IV. 결론

본 연구는 칠레 코이아이게 지역에서 환경지표(초미세먼지 환경기준, 예보제, 대기환경지수)를 이용하여 초미세먼지의 특성을 평가하였다. 초미세먼지 자료는 2013년부터 2022년까지 10년 동안의 자료를 이용하였으며, 기상자료는 2017년부터 2022년까지 자료를 활용하였다.

분석기간 동안 연평균 28.7%에 해당하는 2,517회가 칠레의 24시간 평균 환경기준을 초과하였다. 특히 4월부터 9월까지는 매월 10회 이상 24시간 평균 환경기준을 초과하였다. 그리고 5월과 6월에는 대부분 시간대에서 초미세먼지의 평균 농도가 환경기준을 초과하는 것으로 평가되었다. 초미세먼지의 연평균 농도는 $48\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 칠레의 연평균 기준과 세계보건기구의 연평균 기준에 비해 2.4배와 9.8배 높게 분포하였다.

칠레 정부의 초미세먼지 예보제에서 가장 높은 단계인 경고 단계의 고농도 사례는 3월에서 11월까지 발생하였고, 특히 6월에서 8월까지 3달 동안에 경고 사례는 월평균 17.3일 발생하였다. 5월과 8월에는 경고 단계 수준의 초미세먼지 농도가 다른 단계에 비해 가장 많이 발생하였지만, 같은 기간 발생일은 가장 적었다. 이것은 겨울철에는 하루 동안 경고에 해당하는 $170\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 초미세먼지가 많은 시간에 걸쳐 발생하는 것을 의미하기 때문에, 시민들의 외출 자체가 필요한 단계라 할 수 있다. 시간대별 예보제의 농도분포에서는 주의 단계의 평균 농도만 칠레 정부의 24시간 평균 환경기준을 충족하였다. 경고 단계에 해당하는 농도의 경우 모든 시간대에서 칠레의 24시간 평균 기준보다 2.2배 높았고, 세계보건기구의 24시간 평균보다 6.4배 높게 분포하였다.

6단계의 대기환경지수 분석에서는 4월부터 9월까지 민감군에 나쁨 단계 이상이 50% 이상 발생하였다. 나쁨 이상의 대기질도 6월과 7월에 71%까지 발생하였다.

코이아이계에서 초미세먼지가 고농도로 발생하는 시기는 기온이 낮아지고 풍속도 낮아지는 겨울철이며, 겨울에는 여름보다 초미세먼지가 12.7배 높게 관측되었다. 그리고 대기질 지수에 따른 풍속의 변화에서 좋음에서 위험 단계로 초미세먼지가 증가할수록 풍속은 감소한 것으로 평가되었다. 반면 강수량은 겨울철에 가장 많이 발생하여서 이 지역의 초미세먼지 저감에 중요한 역할을 하는 것으로 평가되었다.

초미세먼지의 장기간 경향성에서 분석 기간의 모든 자료의 경향성은 통계적으로 유의하게 감소 경향을 나타내었다. 그러나 대기환경지수의 위험 단계의 경우는 통계적으로 유의하지 않았으며, $300\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 고농도에서는 오히려 연평균 $6.9\mu\text{g}/\text{m}^3$ 씩 증가하는 것으로 분석되었다. 또한 예보제의 주의 이상 단계의 농도와 대기환경지수의 나쁨 이상의 초미세먼지 발생빈도도 여전히 13%와 21%로, 시민들의 건강을 위한 초미세먼지 환경기준을 충족하기 위해서는 현재의 대기 정책을 개선하여 난방용 바이오매스 사용을 저감할 수 있는 정책이 필요하다.

참고문헌

- 장유운(2022), 「칠레 코이아이계의 고농도 초미세먼지의 특성 연구」, 중남미 연구, Vol 41, pp. 120-154.
- Aravena, D., Estay, N.P., Otero, S., Muñoz, M., Garcia, K., Maripangui, R., Valdes, A., and Morata, D.(2016), “Geothermal Exploration in the Aysén Region, Chilean Patagonia”, New Zealand Geothermal Workshop.
- energiE(2022), “Roadmap for the Energy Transition in Chile”, MRC, <https://www.enel.cl/content/dam/enel-cl/conoce-enel/transicion-energetica/Roadmap-for-the-Energy-Transition-in-Chile-Final-Report.pdf>
- EPA(2018), “Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air

- Quality – the Air Quality Index(AQI)”, <https://www.airnow.gov/publications/air-quality-index/technical-assistance-document-for-reporting-the-daily-aqi/>
- European Environment Agency(2022), Premature deaths due to exposure to fine particulate matter in Europe, 2025.11.25, <https://www.eea.europa.eu/ims/health-impacts-of-exposure-to>
- Gómez, W., Chávez, C., Salgado, H., and Vásque, F.(2017), “Lessons from a pilot program to induce stove replacements inChile: design, implementation and evaluation”, *Environmental Research Letters*, Vol. 12, No. 11.
- Guerrero, F., Yáñez, K., Vidal, V., and Cereceda-Balic, F.(2019), “Effects of wood moisture on emission factors for PM2.5, particle numbers and particulate-phase PAHs from Eucalyptus globulus combustion using a controlled combustion chamber for emissions”, *Science of the Total Environment*, Vol. 648, pp. 737-744, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.057>.
- Jin, T., Amini, H., Kosheleva, A., Yazdi, M.D., Wei, Y., Castro, E., Di, Q., Shi, L., and Schwartz, J.(2022), “Associations between long-term exposures to airborne PM2.5 components and mortality in Massachusetts: mixture analysis exploration”, *Environ Health*, Vol. 21, No. 96.
- John, B.(2019), “A city suffocating: most polluted city in Americas struggles to change”, *The air we breathe*, <https://www.theguardian.com/cities/2019/jul/17/a-city-suffocating-most-polluted-city-in-americas-struggles-to-change-coyhaique-chile>
- Li, W., Lin, G., Xiao, Z., Zhang, Y., Li, B., Zhou, Y., Ma, Y., and Cha, E.(2022a), “A review of respirable fine particulate matter (PM2.5)-induced brain damage”, *Frontiers in Molecular Neuroscience*, Vol. 15, <https://doi.org/10.3389/fnmol.2022.967174>
- Li, Y., Muñoz-Ibañez, F., Maldonado-Alcaíno, A., Jack, D., Yan, B., Xu, L., Acuña, M., Leiva-Guzman, M., Valdés, A., and Cáceres, D. D.(2022b), “Cancer Burden Disease Attributable to PM2.5 and Health Risk by PM2.5-bound Toxic Species in Two Urban Chilean Municipalities”,

- Aerosol and Air Quality*, Vol. 22, <https://doi.org/10.4209/aaqr.220247>
- Lim, Y.-H., Kim, S., Han, C., Bae, H.-J., Seo, S.-C., and Hong, Y.-C.(2020), “Source country-specific burden on health due to high concentrations of PM2.5”, *Environmental Research*, Vol. 182.
- Liu, Z., Shen, L., Yan, C., Du, J., Li, Y., and Zhao, H.(2020), “Analysis of the Influence of Precipitation and Wind on PM2.5 and PM10 in the Atmosphere”, *Advances in Meteorology*, Vol. 2020, <https://doi.org/10.1155/2020/5039613>
- Mailloux, N.A., Abel, D.W., Holloway, T., and Patz, J.A.(2022), “Nationwide and Regional PM2.5-Related Air Quality Health Benefits From the Removal of Energy-Related Emissions in the United States”, *GeoHealth*, <https://doi.org/10.1029/2022GH000603>
- Maripanguí, R, Muñoz, M., Aravena, D., Garía, K., Daniele, L., and Morata, D.(2016), “Assessment of Geothermal Heat Pump Heating Systems in Coyhaique City, Chilean Patagonia”, New Zealand Geothermal Workshop.
- Merk, R., Heßelbach, K., Osipova, A., Popadić, D., Schmidt-Heck, W., Kim, G.-J., Günther, S., Piñeres, A.G., Merfort, I., and Humar, M.(2020), “Particulate Matter (PM2.5) from Biomass Combustion Induces an Anti-Oxidative Response and Cancer Drug Resistance in Human Bronchial Epithelial BEAS-2B Cells”, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 17, No. 21, <https://doi.org/10.3390/ijerph17218193>
- Millstein, D., Wiser, R.H., Bolinger, M., and Barbose, G.L.(2017), “Energy Analysis and Environmental Impacts Division Lawrence Berkeley National Laboratory”, *Electricity Markets & Policy*, DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/nenergy.2017.134>
- Ministerio Del Medio Ambiente(2021), Decreto 12 Establece Norma Primaria De Calidad Ambiental Para Material Particulado Fino Respirable MP 2,5, <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1025202>
- Molina, C., Toro, A.R., Morales, S.R.G., Manzano, C., and Leiva-Guzmán, M.A.(2017), “Particulate matter in urban areas of south-central Chile exceeds air quality standards”, *Air Qual Atmos Health*, Vol. 10, No. 5, pp.

- 653-667.
- Molnár, P., Gustafson, P., Johannesson, S., Boman, J., Barregård, L., and Sällsten, G.(2005), “Domestic wood burning and PM2.5 trace elements: Personal exposures, indoor and outdoor levels”, *Atmospheric Environment*, Vol. 39, pp. 2643-2653, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.01.016>
- OECD (2014), “Chile’s Pathway to Green Growth: Measuring progress at local level”, https://www.oecd.org/cfe/leed/Green_growth_Chile_Final_2014.pdf
- Perez, P., Menares, C., and Ramírez, C.(2020), “PM2.5 forecasting in Coyhaique, the most polluted city in the Americas”, *Urban Climate*, Vol. 32, <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100608>
- Reyes, R., Schueftan, A., Ruiz, C., and González, A.D.(2019), “Controlling air pollution in a context of high energy poverty levels in southern Chile: Clean air but colder houses?”, *Energy Policy*, Vol. 124, pp. 301-311.
- Ruiz-Tagle, J.C. and Schueftan, A.(2019), “Reducing Air Pollution through Behavioral Change of Wood-Stove Users: Evidence from an RCT in Valdivia, Chile”, http://a2s.cl/nuevo/wp-content/uploads/2020/03/Reducing_Air_Pollution_through_Behavioral_Change_of_Wood-Stove_Users_Evidence_from_an_RCT_in_Valdivia_Chile_en.pdf
- Schueftan, A., Sommerhoff, J., and González, A.D.(2016), “Firewood demand and energy policy in south-central Chile”, *Energy for Sustainable Development*, Vol. 33, pp. 26-35.
- Sharma, S., Chandra, M., and Kota, S.H.(2020), “Health Effects Associated with PM2.5: a Systematic Review”, *Current Pollution Reports*, Vol. 6, pp. 345-367, <https://doi.org/10.1007/s40726-020-00155-3>
- Solís, R., Araya, R.T., Gómez, L., Vélez-Pereira, A.M., Lopez, M., Fleming, Z.L., Viedma, N.F., and Leiva-Guzmán, M.A.(2022), “Long-term airborne particle pollution assessment in the city of Coyhaique, Patagonia, Chile”, *Urban Climate*, Vol. 43, No. 10.
- Torres, R., Baker, N., Bernal, G., Peres, F., Maldonado, A.F., and 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, Vol. 7, No. 1, pp. 15-32.

Weichenthal, S., Kulka, R., Lavigne, E. van Rijswijk, D., Brauer, M., Villeneuve, P.J., Stieb, D., Joseph, L., and Burnett, R.(2017), “Biomass Burning as a Source of Ambient Fine Particulate Air Pollution and Acute Myocardial Infarction”, *Epidemiology*, Vol. 28, No. 3, pp 329-337, DOI: 10.1097/EDE.0000000000000636

장유운

한국외국어대학교 중남미연구소
glarecloud@daum.net

논문투고일: 2023년 3월 26일
심사완료일: 2023년 4월 19일
게재확정일: 2023년 4월 26일

A study on the characteristics of PM2.5 using environmental indicators in Coyhaique, Chile

Yu Woon, Jang

Hankuk University of Foreign Studies

Jang, Yu Woon(2023), "A study on the characteristics of PM2.5 using environmental indicators in Coyhaique, Chile", *Revista Asiática de Estudios Iberoamericanos*, 34(1), 145-165.

Abstract The purpose of this study is to evaluate the characteristics of fine particulate matter (PM2.5) in the Coyhaique region of southern Chile using three environmental indicators (Environmental standards, Air quality forecasting systems, and the Air Quality Index). Hourly PM2.5 data measured from September 2013 to December 2022 and meteorological data (wind speed, wind direction, humidity, temperature, precipitation) provided by the Chilean Meteorological Service from January 2017 to December 2022 were analyzed. High PM2.5 concentrations exceeding the 24-hour environmental standards, forecast levels, and deterioration of AQI occurred most frequently during the winter season (June to August), when biomass burning was most prevalent, especially under conditions of low precipitation, slow winds, and low temperatures. PM2.5 concentrations decreased statistically over the analysis period, but there was no significant change in high-concentration PM2.5 levels corresponding to the hazardous level on the AQI scale. The annual average PM2.5 concentration exceeded the environmental standards set by the Chilean government and the World Health Organization by 2.4 and 9.8 times, respectively. The abnormal environmental indicators evaluated in this region indicate an urgent need for policies to reduce the use of biomass burning for heating during the winter season.

Key words Coyhaique, fine particulate matter, Biomass, Air quality Forecasting System, Air Quality Index