

중남미연구 제41권 3호

2022년 8월 31일 129~154쪽

DOI <http://dx.doi.org/10.17855/jlas.2022.8.41.3.129>

# 칠레 코이아이케시의 고농도 초미세먼지의 특성 연구\*

장 유 운

(한국외국어대학교)

- I. 들어가면서
- II. 코이아이케시의 지형 및 기상 특성
- III. 코이아이케시의 대기질
- IV. 결론

---

\* 이 논문은 2019년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임  
(NRF-2019S1A6A3A02058027).

코이아이케시의 초미세먼지와 미세먼지의 대기질은 남미에서 가장 심각한 상태로 지속되고 있다. 본 연구는 코이아이케시의 대기질의 특성을 이해하고 대기질 개선을 위한 에너지 전환의 시급성을 연구하였다. 칠레 정부와 코이아이케시는 초미세먼지 정책 시행으로 연간 3.15~4.86  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 감축 효과가 있었다. 그러나 코이아이케시의 최근(2019~2021) 겨울철 초미세먼지는 81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 칠레 전체 측정소에서 가장 높았고, 2021년 기준으로 주의(Alert, 80~110  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 이상의 예보에 해당하는 고농도 초미세먼지도 겨울철에 거의 매일 발생하였다. 코이아이케시에서 겨울철  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 의 비율이 0.9 이상으로 높으며,  $\text{NO}_2/\text{SO}_2$  비율도 여름철보다 3.5배 높게 분포하여서 이 지역에서 겨울철에 바이오매스의 영향이 높은 것으로 평가할 수 있다. 코이아이케시에서 겨울철에 대기질이 악화하는 것은 에너지 비용으로 인하여 수분이 많은 바이오매스를 사용함으로써  $\text{PM}_{2.5}$  발생량이 증가하고 있다. 코이아이케시에서는 연료 사용으로 배출되는 이산화질소와 황산화물 그리고 일산화탄소는 칠레 전 지역의 평균보다 여름과 겨울철 모두 낮게 평가되었다. 이것은 코이아이케 지역에서 대기오염을 감축하기 위해서는 바이오매스의 사용을 감축하는 것이 가장 중요한 것으로, 이를 위해서는 바이오매스를 이용하는 난방시스템을 재생에너지로 전환하는 근본적인 연료전환 정책 도입이 필요함을 의미한다. 대체 에너지 설치에 대한 정부의 경제적 지원과 함께 에너지 사용 비용이 바이오매스 비용보다 낮게 유지될 수 있도록 정부의 보조금 지원도 따라야만 코이아이케 지역의 대기질 개선을 기대할 수 있을 것으로 전망된다..

## 주제어

코이아이케, 초미세먼지, 주의, 바이오매스, 연료전환

## I. 들어가면서

칠레 코이아이케(Coyhaique) 시는 파타고니아의 관문으로 알려져 있으며, 연평균 기온이 10도 이하로 겨울철에는 난방을 위해서 주로 바이오매스(목재)를 이용하고 있다. 코이아이케시민들은 지리적으로 삼림이 풍부하며 문화적으로는 바이오매스의 이용이 활성화되어 있어서 가정용뿐만 아니라 초등학교와 병원과 같은 공공시설에서도 바이오매스를 활용하여 난방하고 있다(Jorquera, 2021).

코이아이케시는 인구가 5만 명 수준이고, 남쪽과 북쪽에 1,000m 이상의 산들이 자리 잡고 있으며, 서쪽에도 만년설이 있는 봉우리들로 둘러싸인 분지형 도시이다. 그래서 목재류와 같은 바이오매스를 활용한 난방으로 발생한 매연이 도시에 장시간 정체함으로써 대기오염을 발생시킬 조건이 자연스럽게 형성되어있다(Perez & Gramsch, 2016).

코이아이케시에서 겨울철 난방으로 전기나 천연가스를 사용한다면, 바이오매스를 이용하는 것보다 대기오염을 크게 낮출 수 있지만, 칠레의 에너지 비용이 주변 국가들보다 3배 높은 점을 고려하면 현실적으로 어려운 측면이 있다(Global Issues; Maripangui et al., 2016).

많은 도시에서 고농도 미세먼지는 시민들의 호흡기 관련 건강에 영향을 끼치며, 특히 조기 사망과 관련이 있다(Han et al., 2018; Kim et al., 2019; Liu et al., 2022). 코이아이케시의 겨울철 바이오매스의 이용은 도시의 미세오염뿐만 아니라 실내 공기에도 영향을 끼칠 수 있다(Boso et al., 2019a). Merk et al.(2020)의 연구에 따르면, 바이오매스에서 발생하는 미세먼지는 장기간 노출되면 항암 작용에 저항성을 보이는 등 건강에 악영향을 끼칠 수 있다. Weichenthal et al.(2017)도 바이오매스에 기인한 초미세먼지(PM2.5)가 5ug/m3 증가할 때 65세 이상 고령자에게 심근경색의 위험이 증가하고, 특히 겨울철에 영향이 큰 것으로 평가하였다. De Oliveira(2012)는 브라질의 아마존 지역에서 건기에 발생하는 바이오매스로 인하여 8세 이하의 남자아이 그룹에서 천식에 대한 위험 지수가 증가할 수 있음을 제시하였다.

대기오염물질의 저감을 위해서는 대기오염의 현황을 먼저 파악하고 해당

지역에 적합한 저감 계획을 수립하는 것이 중요하다(Kuklinska et al., 2015; Oliverira et al., 2022; Tan & Mao, 2021). 칠레의 중남부 지역에서는 재생에너지로 잘 알려진 바이오매스가 에너지원으로써 중요한 역할을 한다(Molina et al., 2017; OECD, 2014). 그러나 코이아이케시에서는 겨울철에 난방으로 인한 심각한 대기오염도 발생시키고 있어서 시민들의 건강을 위해서는 대기오염의 수준을 명확하게 이해할 필요가 있다(Boso et al., 2019b). 그렇지만 현재까지 고농도 미세먼지와 관련하여 코이아이케시에서는 바이오매스를 사용하는 난로(stove) 같은 도구의 효율 개선과 건물의 단열에 대한 논의가 주를 이루고 있다. 본 연구에서는 바이오매스를 많이 사용하는 겨울철의 기상 특성과 초미세먼지 분포 특성을 분석하고, 이를 통해 코이아이케시에서 미세먼지를 제어하기 위해서는 바이오매스를 대체할 수 있는 지속가능 에너지로의 전환 시급성을 제시하고자 하였다.

## II. 코이아이케시의 지형 및 기상 특성

도시의 지형 특성에 따라 대기오염물질의 축적과 확산에 차이가 발생하는 데, 코이아이케시는 칠레 남쪽에서 두 번째 주에 있는 아이센(Aysén) 주의 주도로, 주변에는 1,000m 높이의 산으로 둘러싸여 있는 분지 형태의 도시이다<그림 1>.

일반적으로 도시 대기질은 지형적 영향과 함께 바람(풍향과 풍속), 대기 온도, 상대습도 그리고 강수량의 영향을 받는다. 본 연구에서는 1957년부터 관측되어온 칠레 기상청 자료 중에 시간별 측정자료가 있는 2013년부터 2021년의 자료를 이용하여, 코이아이케시의 풍속, 풍향, 대기 온도, 상대습도, 강수량을 분석하였다<그림 2>. 코이아이케시의 연평균 기온은 8.9℃로 대기오염물질이 대기에서 화학반응을 하기에는 낮은 온도이며, 연평균 풍속은 3m/s였다. 코이아이케시가 남위 45.5도에 있어서 주 풍향은 서풍이었으며 계절에 따른 풍속 변화에 비해 풍향의 변화는 없었다<그림 3>. 연평균 강수량은 942mm로 연간 강수 변화율은 23.8%의 차이가 있었으며,

평균 강수일은 177일로 강수량이 적은 연도(2016년, 2021년)에는 강수일은 평균 25일 감소하였다.

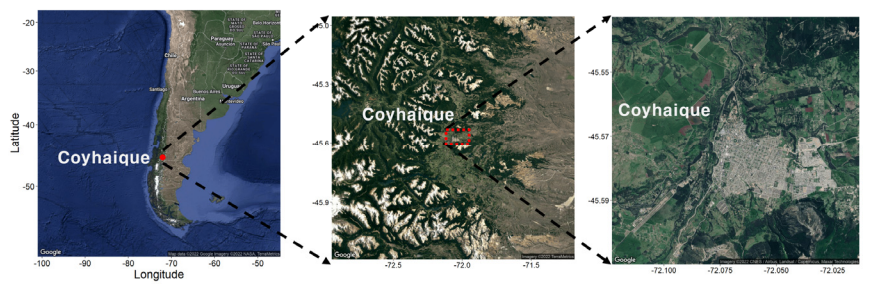


그림 1. 코이아이케시의 위치

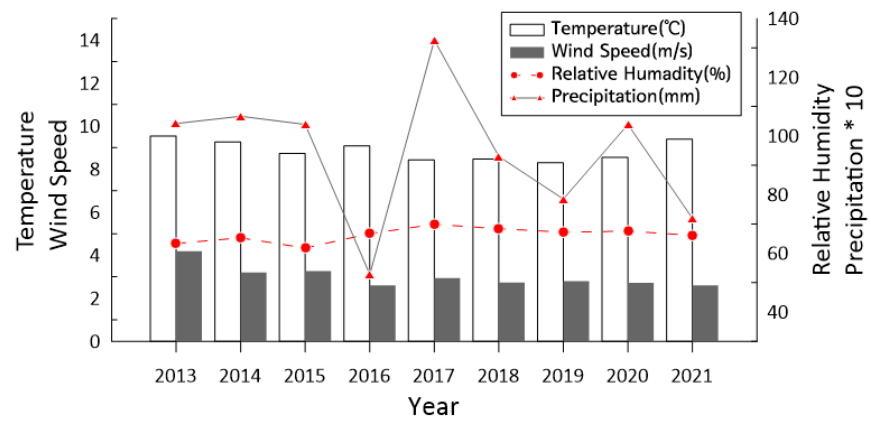


그림 2. 코이아이케시의 연평균 기상 특성

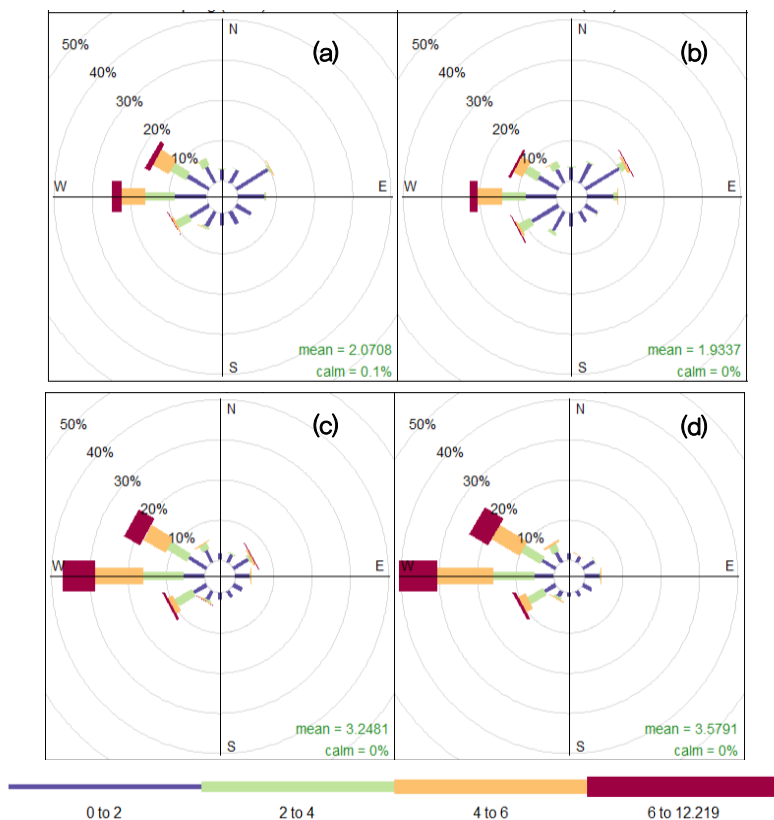


그림 3. 코이아이케시의 계절별 풍향(a) 가을 3~5월, (b) 겨울 6~8월, (c) 봄 9월~11월 (d) 여름 12월~2월

그림 4는 온도, 풍속, 상대습도, 강수량의 월별 증감률(연평균 기준)을 나타낸 것으로 풍속은 겨울철(6월~8월)에 28.6% 감소하고, 상대습도 그리고 강수량은 겨울철에 15.1%와 61.9% 증가하였다. 겨울철에 풍속이 감소하면 초미세 먼지 농도가 증가하게 되며, 겨울철 강수량과 강수일수 증가는 대기오염물질 을 감소시키는데 이바지할 수 있다(Liu et al., 2020).

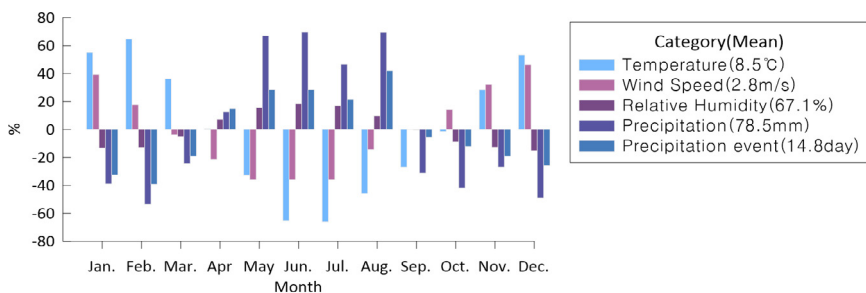


그림 4. 월별 기상 요소의 증감률(2013~2021년 월평균 기준)

그림 5는 코이아이케시의 온도, 풍속, 상대습도 그리고 강수량의 여름과 겨울철 누적 분포를 보여주고 있다. 코이아이케시에서 관측된 대기 온도는 여름철에는 최대 32℃에 이르지만 90% 이상은 20℃ 이내로 분포하며, 겨울에는 90% 이상의 온도가 8℃ 이내로 분포하여서 난방이 필요한 지역으로 평가할 수 있다. 겨울철 풍속은 50% 이상이 1m/s 이하의 낮은 풍속이 관측되고, 5m/s 이상의 강한 바람은 10% 이내로 분포하고 있어서 겨울철에 대기 오염 물질의 확산보다는 대기오염물질의 정체에 유리한 조건으로 평가된다.

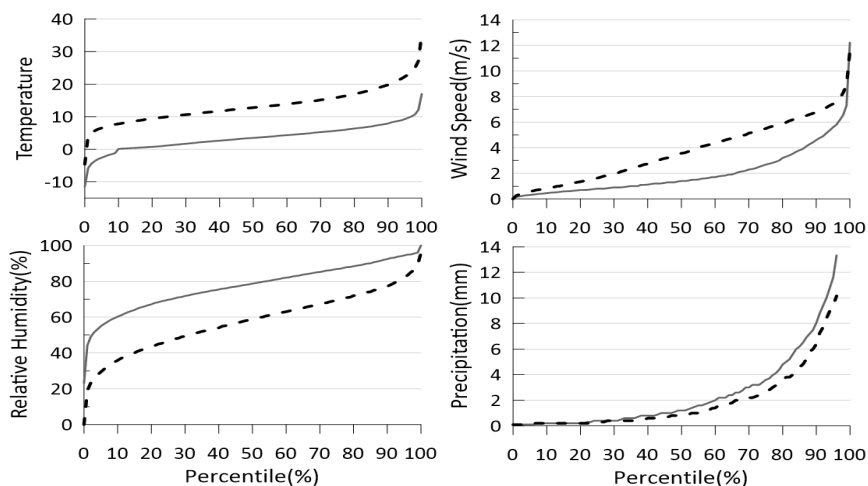


그림 5. 코이아이케시의 여름(점선)과 겨울(실선)의 기상 요소 누적 분포

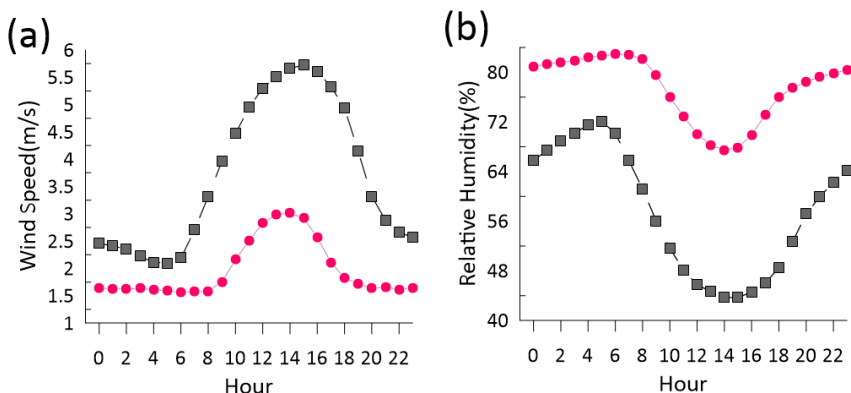


그림 6. 코이아이케시의 시간별 풍속(a)과 상대습도(b) (원: 겨울, 사각형: 여름)

겨울철 풍속은 여름철 풍속보다 새벽(1시~6시)에 28.5%, 주간(7시~18시)에 51.3% 그리고 밤(19시~24시)에 45.3%로 낮아지는 것으로 분석되었다<그림 6>. 그리고 겨울철에 밤과 새벽 풍속은 주간 풍속보다 41.7% 낮아서 대기오염물질이 도시에 잘 축적되는 조건인 것으로 분석되었다. 코이아이케시의 여름철 기상 조건은 겨울철과 달리 주간 풍속이 강하고, 상대습도가 낮아서 대기오염물질의 확산에 유리하고 초미세먼지 생성에 불리한 상태로 평가되었다.

### III. 코이아이케시의 대기질

#### 1. 코이아이케시와 칠레 대기질 비교

칠레 정부는 219개의 측정망을 운영하고 있으며, 미세먼지(PM10)와 초미세먼지(PM2.5)를 각각 169개 측정소와 109개 측정소에서 관측하고 있다. 표 1은 칠레의 대기 자동 측정소 자료 중 검증이 완료된 51개 측정소의 자료를 분석하여 코이아이케시의 관측자료와 비교 분석한 것이다. 코이아이케시는 초미



세면지가 칠레에서 가장 심각했지만, 자동차와 화석연료 사용으로 주로 배출되는 이산화질소(NO<sub>2</sub>)와 일산화탄소(CO)는 가장 낮았다. 이는 코이아이케시가 칠레 남부에 위치함에 따라 난방을 위해 사용하는 바이오매스의 영향을 받지만, 교통이나 산업시설에서 발생하는 화석연료의 영향은 크지 않다는 것을 의미한다. 칠레 정부의 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 환경기준은 연평균 50 $\mu$ g/m<sup>3</sup>과 20 $\mu$ g/m<sup>3</sup>으로 코이아이케시의 경우 환경기준을 각각 1.4배와 2.5배 초과하였다.

표 1. 코이아이케시의 대기오염물질 농도 특성(2013~2021)

내용	PM <sub>2.5</sub> ( $\mu$ g/m <sup>3</sup> )	PM <sub>10</sub> ( $\mu$ g/m <sup>3</sup> )	O <sub>3</sub> (ppb)	NO <sub>2</sub> (ppb)	SO <sub>2</sub> (ppb)	CO (ppm)
칠레 전국 측정소	51개	35개	15개	11개	12개	4개
측정소 평균 농도 범위	4.9~50.2	15.1~71.2	9.4~26.3	6.3~28.6	1.34~10.2	0.9~2.4
코이아이케시 농도	50.2	67.5	12.7	6.3	1.91	0.9

※ 코이아이케시의 NO<sub>2</sub> 측정은 2013~2017년까지 관측됨

그림 7은 대기오염물질의 겨울과 여름 농도 특성을 코이아이케시와 칠레의 전체 측정소와 결과를 비교한 것이다. 코이아이케시에서 대기오염물질은 여름에는 칠레의 전체 측정소의 오염물질보다 대부분 낮은 특성(일산화탄소(CO): 4.9배, 이산화질소(NO<sub>2</sub>): 5.6배, 오존(O<sub>3</sub>): 2배, 미세먼지(PM<sub>10</sub>): 1.7배, 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>): 0.96배)을 보이지만, 겨울에는 코이아이케시의 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>가 칠레 모든 대기 측정소의 평균 농도보다 각각 1.6배와 2.4배 높게 분포하였다.

PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 겨울과 여름 농도 차이는 칠레 전 지역의 경우 각각 1.8배와 3.9배지만, 코이아이케시에서는 각각 5배와 8.8배로 더 높게 관측되었다.

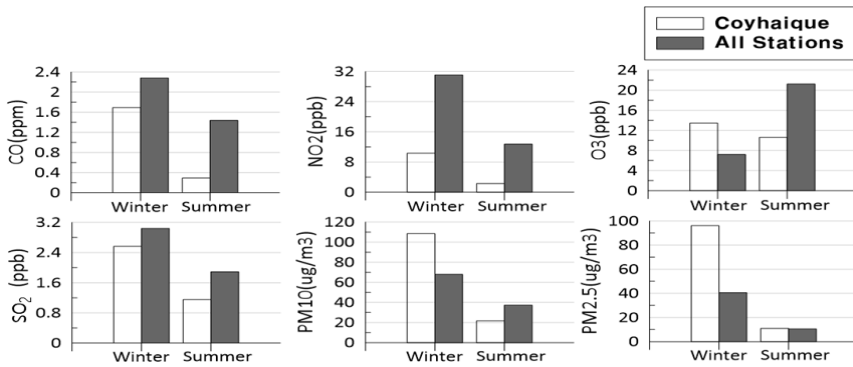


그림 7. 칠레 측정소의 겨울과 여름철 대기오염물질 농도 분포

## 2. 코이아이케시와 산티아고시의 초미세먼지 농도의 일별 변화 특성

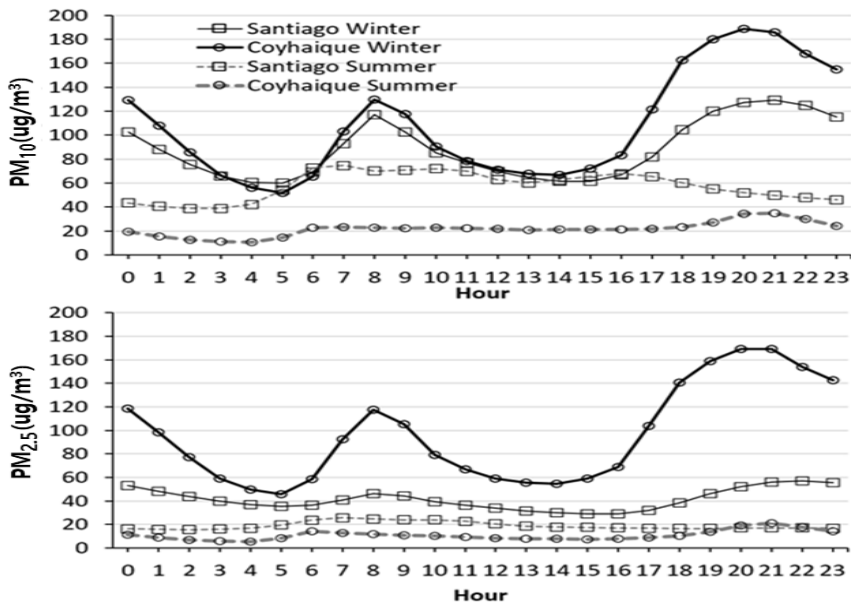


그림 8. 산티아고시와 코이아이케시에서 여름과 겨울철 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 일별 변화

칠레의 작은 지방 도시인 코이아이케시와 칠레의 대표적 도시인 산티아고시의 미세먼지와 초미세먼지 특성을 그림 8에 나타내었다. 겨울철에 두 도시의 PM10은 오전과 낮에는 비슷한 농도 분포를 보였지만, 야간에는 코이아이케시에서 최대 35% 높게 분포하였다<그림 8>. 초미세먼지의 분포도 두 도시 모두 겨울철에 높은 특성을 보여주었지만 코이아이케시에서 아침에 최대 60% 높았고, 야간에도 최대 72% 높은 농도가 발생하였다. 미세먼지와 초미세먼지는 모두 코이아이케시에서 고농도로 분포하는 것은 야간에 바이오매스를 이용한 난방에 기인한 것으로 평가된다(Reyes et al., 2021). 특히 겨울철 코이아이케시의 초미세먼지 농도는 대부분 시간대에서 미세먼지와 같은 수준의 농도 분포를 보였으며, 이것은 코이아이케시에서 여름철 미세먼지 농도가 초미세먼지 보다 2배 높은 수준인 것과 차이를 보여준다.

그림 9는 겨울철 코이아이케시의 측정소와 산티아고시의 관측한 시간별·월별 PM2.5와 PM10의 비율을 나타낸 것이다. 도시지역인 산티아고시보다 지방인 코이아이케시에서 겨울철 바이오매스 사용 증가로 PM2.5/PM10 비율이 높게 분포하였다(Savickas et al., 2021; Solís et al., 2022). NO2/SO2 비율에서도 코이아이케시와 산티아고시 모두 겨울철에 3.5배와 1.7배 높게 분포하였으며, 코이아이케시에서 겨울철 바이오매스의 영향으로 N/S 비율이 증가한 것으로 평가된다(Wang et al. 2021).

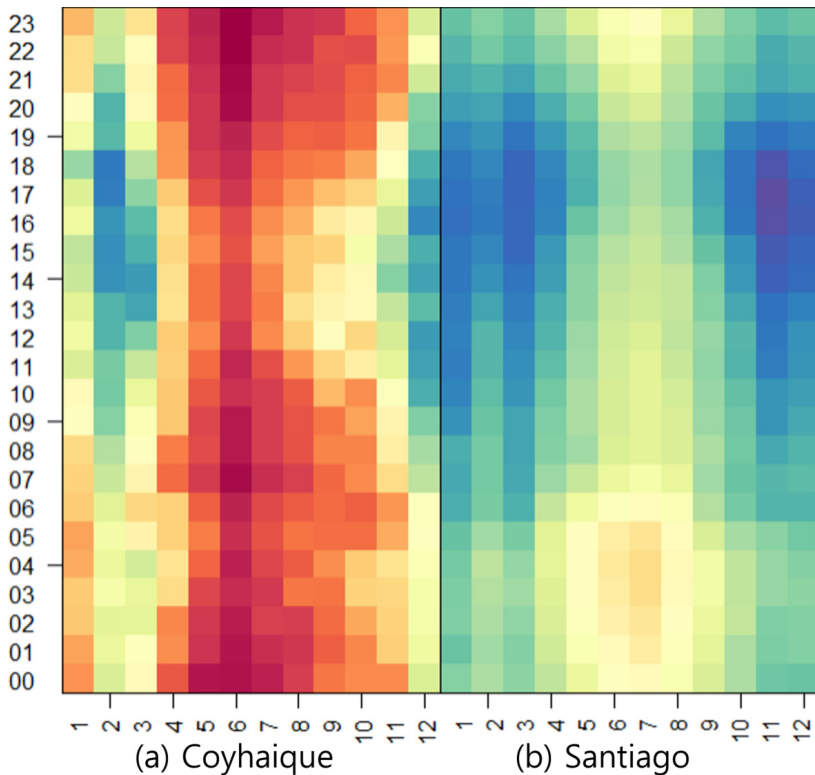


그림 9. 겨울철 코이아이케시와 산티아고시의 PM2.5/PM10 비율

### 3. 장기간 초미세먼지의 추세

2013년부터 2021년까지 측정자료에서 초미세먼지의 월평균 농도 추세를 분석하였을 때 통계적으로 유의성을 보인 측정소는 77.4%가 감소 추세를 나타내었고, 13%의 측정소는 증가 추세 그리고 10%의 측정소는 통계적으로 농도 변화가 없었다<표 2>. 코이아이케시에서 초미세먼지의 감소 특성은 주택단열, 효율적인 스토브 교체, 건조 바이오매스 사용 그리고 시민 교육 강화 등 향후 초미세먼지와 미세먼지를 저감하기 위한 정책 시행의 결과에 따른 것으로 평가된다(Bao et al, 2019a).

표 2. 칠레 PM2.5 측정망의 겨울철 초미세먼지 감소 추세와 농도

측정소	연간 감소량(ug/m <sup>3</sup> )	2019~2021(ug/m <sup>3</sup> )
Coyhaique	3.15 ~ 4.86	81.0
Las Encinas	1.8 ~ 3.18	46.4
Linares	1.59 ~ 2.73	54.9
La Florida	1.07 ~ 2.5	53.9
Inia Chillan	0.79 ~ 2.23	23.7
Rancagua1	0.87 ~ 2.16	45.7
Rancagua2	0.62 ~ 1.97	50.3
Copiapo Sivica	1.08 ~ 1.48	16.8
Osorno	0.48 ~ 1.86	68.0
Univeridad Talca	0.58 ~ 1.22	30.6
Valparaiso	0.47 ~ 1.02	15.8
Bosque	1.2 ~ 0.51	47.1
Coquimbo	0.67 ~ 0.87	14.7
Ohiggins	0.6 ~ 0.81	37.8
Antofagasta	0.41 ~ 0.96	14.8
Huasco Sivica	0.54 ~ 0.69	10.3
Curico	0.07 ~ 1.04	46.0
Arica	0.34 ~ 0.76	11.8
La Serena	0.15 ~ 0.82	16.8
Florida	0.25 ~ 0.41	36.4
Las Condes	0.22 ~ 0.38	22.8
UC Maule	0.21 ~ 0.28	33.1
Valdvia	0.5 ~ 0.86	42.4
Punta Arenas	0.11 ~ 0.23	5.2

칠레 정부의 대기질 정책에 따라 대기질이 가장 많이 개선된 지역이 코이아이케시이지만, 최근(2019~2021) 대기질은 여전히 칠레에서 가장 심각한 수준으로 평가되고 있다. 칠레 정부에서는 초미세먼지의 환경기준을 24시간 평

균 50ug/m<sup>3</sup>으로 설정하고 있으며, 세계보건기구는 2021년에 초미세먼지 기준을 24시간 평균 25ug/m<sup>3</sup>에서 15ug/m<sup>3</sup>으로 강화하였다. 그림 10은 2021년 코이아이케시와 산티아고시에서 세계보건기구(WHO)와 칠레 정부의 초미세먼지 초과 일을 나타낸 것이다. 세계보건기구의 기준에 따르면 코이아이케시에서는 3월부터 10월까지 매월 25일 이상이 초미세먼지 기준을 초과하였으며, 칠레 정부의 기준에서도 5월부터 8월까지 겨울철에는 20일 이상 초미세먼지가 기준을 초과하였다. 시간별 발생 횟수로는 세계보건기구 기준으로 겨울철에 87.5%가 기준을 초과하였고, 칠레 정부 기준으로 41%를 초과하였다.

코이아이케시에서 2021년에 초미세먼지에 대한 주의(Alert, 80~110ug/m<sup>3</sup>), 예비경고(Pre-Emergency, 110~170ug/m<sup>3</sup>), 경고(Emergency, 170ug/m<sup>3</sup> 이상)에 해당하는 고농도 발생일은 총 96일로 평가되었다. 그리고 주의 이상의 발생 횟수는 938회로, 밤(18시~24시)에 45%가 발생하였고 새벽(1시~6시)에 22%가 발생하였다.

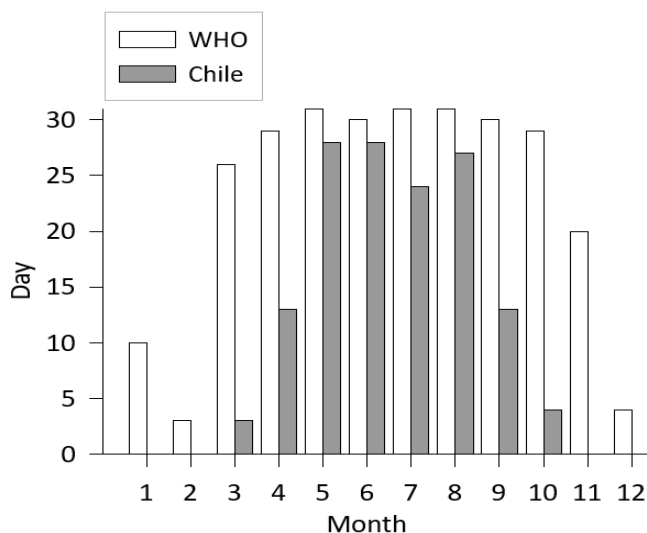


그림 10. 2021년 코이아이케시의 초미세먼지 초과일

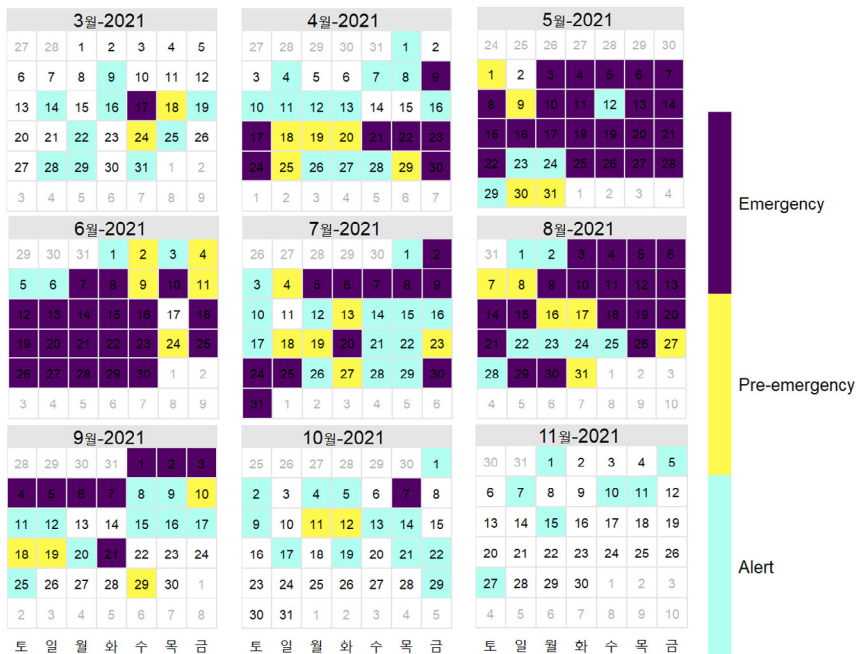


그림 11. 2021년 코이아이케시의 예보 발생일

코이아이케시에서 초미세먼지의 주의(Alert) 이상 발생일은 가을(3월~5월)부터 발생하였으며, 여름(6월~8월)에는 하루를 제외하고 모두 발생하였고, 봄(9월~11월)에도 관측되었다<그림 11>. 그리고 5월부터 9월까지 경고(Emergency)에 해당하는 고농도 초미세먼지가 연속적으로 빈번하게 발생하고, 300ug/m3 이상의 매우 심각한 수준의 초미세먼지 농도도 170회 발생하였다. 이러한 코이아이케시의 초미세먼지 수준은 칠레 정부와 코이아이케시에서 오랜 기간 시행해 온 바이오매스 저감 정책보다는 재생 에너지 같은 청정 연료에너지 도입을 통해 시민들의 건강권을 확보하는 것이 중요할 것으로 사료된다.

#### 4. 대기질 정책의 도입 제언

코이아이케시는 대기질 개선을 위하여 2014년부터 2019년까지 주택단열, 건조 바이오매스 생산, 청정 바이오매스용 스토브 교체, 경고(Emergeny) 예보 일에 바이오매스 이용금지와 같은 정책을 시행하고 있으며, 예산의 96.2%는 주택 단열 개선에 사용되었다(Ministerio de Energia, 2020). 코이아이케시에서 여름과 겨울 강수량은 71.6mm와 318mm로 겨울철에 미세먼지 저감에 기여할 것으로 평가할 수 있다. 반면에 난방용 바이오매스는 습도가 높은 상태로 사용될 가능성이 있다. 칠레 정부에서 권장하는 건조한 바이오매스에 비해 습도가 높은 바이오매스는 가격이 저렴하기 때문이다(Global Issues). Guerrero et al(2019)은 바이오매스의 습도가 건조한 상태보다 25% 높으면 불꽃 온도가 낮아져서 연료 효율이 감소하고, 불완전 연소로 인한 일산화탄소가 증가하며, 초미세먼지도 10배 이상 더 많이 배출될 수 있고, 건강에 해로운 다환방향족 고리화합물(PAHs, Polycyclic Aromatic Hydrocarbon) 성분도 50% 증가하는 결과를 제시하였다. Maripangui et al(2016)의 연구에서도 바이오매스의 수분이 높으면 미세먼지(PM10) 배출량이 1.6배 증가하였다.

Oliveira et al.(2022)은 시민 주도 대기질 개선과 건강 연구를 통해서 주택 분야에서는 미세먼지 감소 효과는 저조한 것으로 평가하였다. 대기오염이 심각한 도시에서는 대기오염물질의 배출량을 감소시킴으로써 시민들의 호흡기 질환을 개선할 수 있다(Kim et al., 2019). 시민들이 악화된 대기질에 적응되어 있거나 일상을 받아들이는 상황에서는 도시 대기질 개선을 위한 정책이 성과를 거두는 데 한계가 있기 때문이다(Boso et al., 2019a). 더구나 칠레 중남부 지역의 경우 시민의 에너지 빈곤 또한 바이오매스 이용을 줄이는 것은 어려울 수 있다(Calvo et al., 2022).

바이오매스를 이용하는 스토브를 대체하여 전기를 이용한 스토브를 보급하는 정책의 경우에 높은 전기료가 문제 될 수 있다(Ministerio de Energía, 2020). UN에서 계획한 지열 발전의 경우 시민들의 에너지 유지비가 바이오매스 보다 낮은 것으로 평가되기도 하지만, 초기 투입비용이 높은 단점이 있다(Savickas, et al., 2020). 태양광 발전의 경우 코이아이케시의 겨울철 낮은 일사



량과 강수 발생일을 고려하면 운영효율이 낮지만, 더 많은 용량을 설치해야 한다(Tribaldoss et al., 2020). 풍력 발전의 경우 코이아이케시에서 북동쪽으로 42km 떨어진 지역에 2027년까지 36MW의 풍력 발전을 설치할 계획이 있지만 예상 비용은 8,200만 달러에 이른다(Palma-Behnke et al., 2021).

이와 같이 바이오매스를 대체할 수 있는 재생에너지의 활용은 비용적인 측면에서 개발자와 시민들에게 모두 부담이 될 수 있어서, 칠레 정부 또는 국제 협력을 통한 경제적 지원이 반드시 따라야만 한다.

## IV. 결론

본 연구는 코이아이케시의 대기질의 특성을 이해하고 대기질 개선을 위한 에너지 전환의 필요성을 연구하였다. 코이아이케시의 대기질은 낮은 기온의 영향으로 가을(3월)부터 대기질이 악화되기 시작해서 봄(11월)까지 영향을 미친다. 코이아이케시에서 겨울철에 대기질이 악화되는 것은 바이오매스의 사용과 기상 요인(높은 상대습도, 느린 풍속, 야간 역전층)에 따른다. 바이오매스를 주로 이용하는 것은 전기나 천연가스보다 에너지 비용이 저렴하기 때문이다. 에너지 비용으로 인하여 수분이 많은 바이오매스를 사용함으로써 초미세먼지 발생량이 가중되고 있다.

코이아이케시의 겨울철 초미세먼지 농도 수준은 칠레의 모든 측정소보다 높게 관측되었으며, 대표 도시인 산티아고시와 비교했을 때도 최대 72% 높게 분포하였다.

코이아이케시에서 풍속은 야간과 새벽에 가장 낮게 평가되었고 상대습도도 새벽과 야간에 가장 높게 분포하였다. 이 시간에 난방을 위한 바이오매스를 사용함으로써 코이아이케시에서 야간과 새벽에 초미세먼지 농도가 최대 로 관측되었다. 코이아이케시에서 PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>의 비율이 0.9 이상으로 높으며, NO<sub>x</sub>/SO<sub>2</sub> 비율도 여름철보다 3.5배 높게 분포하여서 이 지역에서 겨울철에 바이오매스의 영향이 높은 것으로 평가할 수 있다.

칠레 정부와 코이아이케시에서 시행하는 에너지 효율이 높은 스토브 교체

와 주택 단열 지원 정책으로 초미세먼지는 연간 3.15~4.86 ug/m<sup>3</sup>씩 감소하였다. 그러나 최근(2019~2021) 초미세먼지와 미세먼지는 여전히 칠레 정부의 환경기준을 초과하고 있으며, 칠레의 모든 대기 측정소에서 가장 높게 분포하였다. 2021년 기준으로 주의(Alert)에 해당하는 측정이 938회 관측되었고, 주의 이상 예보에 해당하는 고농도 초미세먼지도 겨울철에 거의 매일 발생하였다.

코이아이케시에서는 연료 사용으로 배출되는 이산화질소와 황산화물 그리고 일산화탄소는 칠레 모든 지역 측정소의 평균보다 여름과 겨울철에 낮게 평가되었다. 이것은 코이아이케시에서 대기오염을 감축하기 위해서는 바이오매스의 사용을 감축하는 것이 가장 중요한 것으로, 이를 위해서는 바이오매스를 이용하는 난방시스템을 다른 연료로 전환하는 근본적인 정책의 도입이 필요함을 의미한다.

코이아이케시를 포함한 칠레 남부지역에서 수분이 많이 포함되어 초미세먼지가 많이 발생하는 바이오매스를 사용하는 것은 에너지 비용 때문이다. 따라서 대기질 개선을 위한 연료 전환 정책을 성공하기 위해서는 에너지 설비의 도입에 대한 정부의 경제적 지원과 함께 에너지 사용 비용이 바이오매스 비용보다 낮게 유지될 수 있도록 정부의 보조금 지원도 따라야만 코이아이케시의 대기질 개선을 기대할 수 있을 것으로 전망된다.

## 참고자료

- Boso, À., Oltra, C., & Hofflinger, Á. (2019a). Participation in a programme for assisted replacement of wood-burning stoves in Chile: The role of sociodemographic factors, evaluation of air quality and risk perception. *Energy Policy*, 129, 1220-1226.  
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.03.038>.
- Boso À., Álvarez B., Oltra C., Hofflinger Á., Vallejos-Romero A., & Garrido J. (2019b). Examining patterns of air quality perception: A cluster analysis for southern Chilean cities. *Sage Open*, 9(3), 2158244019863563.
- City Population. AYSÉN region in Chile,  
[https://www.citypopulation.de/en/chile/admin/11\\_\\_ays%C3%A9n/](https://www.citypopulation.de/en/chile/admin/11__ays%C3%A9n/)
- Cuerrero, F., Yáñez, K., Vidal, V., & 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*, 648, 737-744.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.057>
- Calvo, R., Álamos, N., Huneeus, N., & O'Ryan, R. (2022). Energy poverty effects on policy-based PM2.5 emissions mitigation in southern and central Chile. *Energy Policy*, 161.  
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112762>
- Global Issues. Chile's Patagonia seeks small-scale energy autonomy (2014.8.12.).  
<https://www.globalissues.org/amp/news/2014/08/12/19882>
- Han, C., Lim, Y.-H., Yorifuji, T., & Hong, Y.-C. (2018). Air quality management policy and reduced mortality rates in Seoul Metropolitan Area: A quasi-experimental study. *Environment International*, 121, 600-609.
- IQAir (2020). 2019 World Air Quality Report
- Jorquera, H. (2021). Air quality management in Chile: Effectiveness of PM2.5

- regulations. *Urban Climate*, 35.  
<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100764>
- Kim, H., Kim, H., & Lee, J. T. (2019). Effect of air pollutant emission reduction policies on hospital visits for asthma in Seoul, Korea; Quasi-experimental study. *Environment international*, 132, 104954. doi: 10.1016/j.envint
- Kuklinska, K., Wolska, L. & Namiesnik, J. (2015). Air quality policy in the U.S. and the EU – a review. *Atmospheric Pollution Research*, 6(1), 129-137. doi:10.5094/APR.2015.015
- Lie, Z., Shen, L., Du, J., Li, Y., & Zhao, H. (2020). Analysis of the influence of precipitation and wind on PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in the atmosphere. *Advances in Meteorology* 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/5039613>
- Liu, H., Liu, J., Li, M., Gou, P., & Cheng, Y. (2022). Assessing the evolution of PM<sub>2.5</sub> and related health impacts resulting from air quality policies in China. *Environmental Impact Assessment Review*, 93, 106727. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2021.106727>
- Maripangui, R., Aravena, D., Garcia, K., & Daniele, L. (2016). Assessment of geothermal heat pump heating systems in Coyhaique city, Chilean Patagonia. In *Proceedings 38th New Zealand Geothermal Workshop, November*.
- Merk, R., Heßelbach, K., Osipova, A., Popadić, D., Schmidt-Heck, W., Kim, G. J., Günther, S., Piñeres, A. G., Merfort, I., & Humar, M. (2020). Particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) 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*, 17(21), 8193. <https://doi.org/10.3390/ijerph17218193>
- Ministerio de Energia (2015). *Medición del consumo nacional de leña y otros combustibles sólidos derivados de la madera*.

- (2020). *Residential energy transition in Chile*
- Molina, C., Toro A, R., Morales S.R.G. Manzano, C., & Leiva-Guzmán, M. A. (2017). Particulate matter in urban areas of south-central Chile exceeds air quality standards. *Air Qual Atmos Health*, 10(5), 653–667.  
<https://doi.org/10.1007/s11869-017-0459-y>
- De Oliveira, B. F. A., Ignotti, E., Artaxo, P., do Nascimento Saldiva, P. H., Junger, W. L., & Hacon, S. (2012). Risk assessment of PM<sub>2.5</sub> to child residents in Brazilian Amazon region with biofuel production. *Environ Health*, 11(1), 1-11. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-11-64>
- Oliveira, K., Rodrigues, V., Slingerland, S., Vanherle, K., Soares, J., Rafael, S., Trozzi, C., Bouman, E.A., Ferreira, J., Kewo, A., Nielsen, P.S., Diafas, I., Monteiro, A., Miranda, A.I., Lopes, M., & Hayes, E. (2022). Assessing the impacts of citizen-led policies on emissions, air quality and health. *Journal of Environmental Management*, 302, 114047.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114047>
- OECD (2014). *Chile's Pathway to Green Growth: Measuring progress at local level*
- Palma-Behnke, R., Abarca del Río, R., Agostini, C., Alvear, C., Amaya, J., Araya, P., Arellano, N., Arriagada, P., Avilés, C., Barría, C., Berg, A., Buchuk, D., Cardemil, J. M., Dall'Orso, F., Domínguez, M. P., Escauriaza, C., Feijoo, F., Figueroa, A., Flores, C. & Vicuña, S. (2021). *The Chilean potential for exporting renewable energy* (Mitigation and energy working group report). Santiago: Comité Científico de Cambio Climático; Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.
- Perez, P., & Gramsch, E. (2016). Forecasting hourly PM<sub>2.5</sub> in Santiago de Chile with emphasis on night episodes, *Atmospheric Environment*, 124, 22-27.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.11.016>
- Reyes, F., Ahumada, S., Rojas, F., Oyola, P., Vásquez, Y., Aguilera, C., Henriquez, A., Gramsch, E., Kang, C.M., Saarikoski, S., Teinilä, K.,

- Aurela, M., & Timonen, H. (2021). Impact of biomass burning on air quality in Temuco city, Chile. *Aerosol Air Qual. Res.*, 21, 210110. <https://doi.org/10.4209/aaqr.210110>
- Ribera Clara (2016. May 23). Beyond Coyhaique's air pollution, Patagon Journal, Retrived from [https://www.patagonjournal.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=3541%3Amas-alla-de-la-contaminacion-ambiental-que-afecta-a-coyhaique&catid=78%3Amedioambiente&Itemid=268&lang=en](https://www.patagonjournal.com/index.php?option=com_content&view=article&id=3541%3Amas-alla-de-la-contaminacion-ambiental-que-afecta-a-coyhaique&catid=78%3Amedioambiente&Itemid=268&lang=en)
- Savickas, R., Lapuente, P., & Martinez, C. (2021). *The rapid assessment of the district heating development in Quinto Burgos, Coyhaique City, Chile.*
- Seguel, R. (2009). Estimations of primary and secondary organic carbon formation in PM<sub>2.5</sub> aerosols of Santiago City, Chile, *Atmospheric Environment*, 43(13), 2125-2131. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.01.029>
- Solís, R., Toro Araya, R., Gómez, L., Vélez-Pereira, A., Lopez, M., Fleming, Z., Fierro Viedma, N., & Leiva-Guzmán, M. (2022). Long-term airborne particle pollution assessment in the city of Coyhaique, Patagonia, Chile. *Urban Climate*, 43. 101144. DOI: 10.1016/j.uclim.2022.101144
- Tan, Y., & Mao, X.(2021). Assessment of the policy effectiveness of Central Inspections of Environmental Protection on improving air quality in China, *Journal of Cleaner Production*, 288, 125100. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125100>
- Tribaldos, T., Rist, S., Espinoza, A., Honeyman, P. & Cardenas, J.P.(2020). *First protected area 100% energy self-sustaining in Chile*, CDE, University of Bern.
- Wang, Y., Ali, M. A., Bilal, M., Qiu, Z., Mhawish, A., Almazroui, M., Shahid, S., Islam, M.N., Zhang, Y., & Haque, M.N. (2021). Identification of NO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> pollution hotspots and sources in Jiangsu province of China. *Remote Sensing*, 13(18). 3742. <https://doi.org/10.3390/rs13183742>

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(3), 329. doi: 10.1097/EDE.0000000000000636

## ■ 장유운

한국외국어대학교에서 환경학 박사학위(대기화학)를 취득하였으며, 현재 한국외국어대학교 중남미연구소에서 HK+ 교수로 재직 중이다.  
(E-mail: glarecloud@daum.net)

---

## The Study of High Episode of PM<sub>2.5</sub> in Coyhaique city, Chile

Jang, Yu Woon

(Hankuk University of Foreign Studies)

The air quality of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in the city of Coyhaique is the most severe in South America. This study understood the characteristics of air quality in Coyhaique and studied the urgency of energy conversion for air quality improvement. The Chilean government and the city of Coyhaique implemented a PM<sub>2.5</sub> reduction policy to reduce 3.15~4.86ug/m<sup>3</sup> per year. The recent (2019~2021) winter PM<sub>2.5</sub> of Coyhaique city was 81ug/m<sup>3</sup>, which was the highest in all atmospheric measurement stations in Chile. As of 2021, a high concentration of PM<sub>2.5</sub> equivalent to "Alert" also occurred almost every day in winter. In Coyhaique city, the ratio of PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> in winter was 0.9 or more, and the ratio of NO<sub>2</sub>/SO<sub>2</sub> was also evaluated to be 3.5 times higher than in summer. This means that the cause of high PM<sub>2.5</sub> concentrations in winter is the use of biomass burning. Due to energy costs in winter, the use of wet biomass increases PM<sub>2.5</sub> emissions. In the city of Coyhaique, nitrogen dioxide, sulfur oxides and carbon monoxide emitted from fuel use were rated lower in both summer and winter than the average of all atmospheric stations in Chile. In order to reduce air pollution, it is most important to reduce the use of biomass, and it is necessary to introduce a fundamental fuel conversion policy to convert the heating system using biomass into renewable energy. The city's air quality improvement can be expected with government support for the renewable energy installation cost and government subsidies to make energy use costs cheaper than biomass costs.

---



## Key Words

Coyhaique, PM2.5, Alert, Biomass, Fuel conversion

논문 접수일 : 2022년 8월 07일

심사 완료일 : 2022년 8월 18일

게재 확정일 : 2022년 8월 23일