



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

이학석사 학위논문

중국 코로나 봉쇄 정책으로 인한
메탄 농도 변화 분석

2023년 2월

서울대학교 대학원
환경계획학과 환경관리학전공
김 예 인

중국 코로나 봉쇄 정책으로 인한 메탄 농도 변화 분석

지도교수 정 수 중

이 논문을 이학석사 학위논문으로 제출함
2023년 2월

서울대학교 대학원
환경계획학과 환경관리학전공
김 예 인

김예인의 이학석사 학위논문을 인준함
2023년 2월

위 원 장 정 수 중 (인)

부위원장 오 능 환 (인)

위 원 손 석 우 (인)

국문초록

코로나-19 대유행을 막기 위해 2020년 이후 각국에서 시행된 강력한 사회적 거리두기 조치는 다방면의 사회경제적 활동을 제한하여 인위적 활동으로 인한 온실가스 배출량을 일시적으로 감소시켰다. 이에 본 연구에서는 인위적 배출 활동의 변화가 대기 중 메탄 농도에 미치는 영향을 파악하기 위해, 중국의 코로나 봉쇄 기간 전후 안면도에서 관측한 메탄 증가분의 변화 양상을 분석하였다. 인위적 배출량의 기여를 나타내는 메탄 증가분은 중국과 한국 배출원의 영향을 받는 안면도의 메탄 농도에서 청정 대기지역인 미나미토리시마의 메탄 농도를 제거하여 산정하였다. 그리고 각 시간별 메탄 증가분이 주로 기원한 지역을 WRF-STILT 풋프린트 분석을 통해 판단하고, 기원 지역별로 코로나 봉쇄 전후 메탄 증가분에 차이가 있는지 분석하였다.

연구 결과, 2020년 2월~3월 동안 사회적 봉쇄 조치가 시행되었던 중국 지역의 메탄 증가분은 봉쇄 조치가 없었던 평년에 비해 20.0%의 유의미한 감소를 나타냈다. 특히, 석탄 생산 산업이 밀집되어 있어 봉쇄의 영향을 크게 받은 중국 동부 지역에서 34.6%에 이르는 뚜렷한 메탄 증가분 감소가 나타났다. 반면 아직 본격적인 사회적 거리두기 정책이 시행되지 않았던 한국 지역의 메탄 증가분은 평년에 비해 큰 변화가 없었다.

본 연구는 인위적 배출량의 감소가 대기 중 메탄 농도에 즉각적인 영향을 미친다는 것을 지상 관측 자료를 활용하여 확인하였다. 또한, 지상 관측 자료와 대기모형을 함께 이용해 한국과 중국에 이르는 광범위한 지역의 분석이 가능함을 보여주어 지상 관측의 광범위한 활용가능성과 중요성을 시사한다.

주요어 : 메탄, 안면도, 지상 관측, 코로나-19, 배출원
학 번 : 2021-21055

목 차

제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구 배경 및 목적	1
제 2 장 연구 방법	3
제 1 절 연구 범위	3
1. 연구 기간	3
2. 연구의 공간적 범위	4
제 2 절 연구 자료	7
1. 메탄 관측 자료	7
2. 기상 관측 자료	11
제 3 절 연구 방법	12
1. 시간별 메탄 증가분 (ΔCH_4) 산출	12
2. 시간별 메탄 증가분의 기원 지역 분류	15
3. 평균 차이 검정	17
제 3 장 연구 결과 및 토의	18
제 1 절 한국과 중국 기원 일별 메탄 증가분	18
제 2 절 기원 지역별 메탄 증가분의 코로나 봉쇄 전후 변화	22
1. 한국 및 중국 지역 기원 메탄 증가분 변화	22
2. 중국 동부 및 동북부 지역 기원 메탄 증가분 변화	26
제 3 절 중국의 인위적 메탄 배출 활동	28
1. 중국의 메탄 배출 및 흡수	28
2. 에너지 부문 배출량 변화	31
3. 농업 부문 배출량 변화	34

4. 중국의 지역별 에너지 부문 배출 활동 규모	36
제 4 장 결론	38
참고문헌	40
Abstract	48

그림 목차

[그림 1] 한국, 중국 동부, 중국 동북부 지역 분류	5
[그림 2] EDGARv7.0 (Emissions Database for Global Atmospheric Research) 2020년 한국 및 중국 지역 연간 메탄 배출량	6
[그림 3] 안면도 관측소 및 미나미토리시마 관측소의 위치	9
[그림 4] 2017년-2020년 동안의 안면도와 미나미토리시마의 메탄 관측 농도 시계열	10
[그림 5] 메탄 증가분 계산 과정 흐름도	14
[그림 6] 중국 기원 메탄 증가분 시계열	20
[그림 7] 한국 기원 메탄 증가분 시계열	21
[그림 8] 중국 기원 메탄 증가분의 코로나 봉쇄 전후 변화	24
[그림 9] 한국 기원 메탄 증가분의 코로나 봉쇄 전후 변화	24
[그림 10] 중국 동부와 중국 동북부 기원 메탄 증가분의 코로나 봉쇄 전후 변화	27
[그림 11] 2014년 중국 부문별 메탄 배출량	30
[그림 12] 2016-2022년 1분기 중국 총 석탄 생산량	33
[그림 13] 중국 동북부와 중국 동부의 2022년 석탄 생산 능력	37

표 목차

[표 1] 한국과 중국 기원 메탄 증가분의 코로나 전후 평균 차이 검정 결과	25
[표 2] 중국 동부와 중국 동북부 기원 메탄 증가분의 코로나 전후 평균 차이 검정 결과	27
[표 3] 2018-2020년 중국 가축 종별 두수 (단위: 마리)	35

제 1 장 서 론

제 1 절 연구 배경 및 목적

2019년 중국 우한 지역에서 처음 발견된 코로나-19 바이러스의 감염 확산을 막기 위해 중국 정부는 2020년 1월 23일 이후 지역별로 강력한 사회적 봉쇄 조치를 시행했다. 이러한 조치로 인해 주민들의 이동이 제한되었으며 산업 기반 시설의 가동이 중단되었다 (Wu et al., 2020). 사회경제적 활동의 급격한 중단은 화석연료 사용량을 대폭 감축시켰고, 그에 따라 화석연료 이용에서 중국 지역에서 배출되는 대기오염물질 및 온실가스의 배출량도 크게 감소했다(Le Quere et al., 2020; Liu et al., 2020).

유례없이 강력한 사회적 봉쇄 조치는 인위적 활동량의 변화가 대기 중 온실가스 및 대기오염물질 농도에 미치는 영향을 연구할 수 있는 조건을 제공했다. 전 지구 대기 모니터링을 위해 구축된 지상 및 원격 대기 관측망에서는 중국 지역 대기오염물질 및 온실가스의 일시적인 저감 효과가 관측되었다. Tohjima et al (2020)은 하테루마 지점의 지상 관측 자료를 이용해 중국의 화석연료 사용량 감소로 인한 이산화탄소 농도 현상을 탐지했다. 또한, 위성 관측 자료를 통해 중국 지역의 대기 중 이산화질소 농도가 감소한 것이 포착되었다 (NASA, 2020).

그러나 중국의 코로나 봉쇄가 메탄 배출 및 대기 중 메탄 농도에 미친 영향에 대한 연구는 아직 제한적이다. 메탄은 이산화탄소에 이어 두 번째로 지구온난화 기여도가 높은 주요 온실가스로, 기후 위기 완화를 위해서는 인위적 메탄 배출이 대기 중 메탄 농도에 미치는 영향을 이해하는 것이 중요하다. 전 지구적으로 석유 및 천연가스 부문에서 발생하는 메탄 배출량은 2019년에 비해 2020년에 10%가량 감소했다. (IEA, 2020). 그러나 지역별 메탄 배출량의 변화는 해당 지역의 배출원 특성에 따라 서로 다른 양상을 보인다. 미국의 대표적인 석유 및 천연가스 생산

지역인 퍼미안 분지(Permian Basin)의 메탄 배출량은 2019년에 비해 2020년 4월과 5월에 감소했지만 (Lyon et al., 2021), 미국과 캐나다의 도심 메탄 농도는 코로나 이전에 비해 유의미하게 감소하지 않은 것으로 나타났다. 이는 도시의 주요 메탄 배출원이 천연가스 관망, 폐기물, 하수 처리 등으로 코로나 봉쇄로 인해 큰 영향을 받지 않았기 때문이다 (Monteiro et al., 2022). 따라서 중국의 메탄 배출 특성을 고려한 코로나 봉쇄 전후 대기 중 메탄 농도 분석이 필요하다. Liang et al (2023)은 중국 양쯔강 유역에서 관측한 이산화탄소, 메탄, 일산화탄소 증가분이 코로나 봉쇄 기간과 그 직후 이전 연도에 비해 감소했음을 밝혔으나, 구체적인 기원 지역 및 배출원의 영향 분석까지 이어지지 않았다는 한계가 있다. Tohjima et al (2020)의 연구에서도 하테루마 지점에서 관측한 메탄 증가분을 분석에 활용하였으나, 메탄 배출량과 메탄 농도의 관계를 이해하기보다는 이산화탄소 증가분과의 비율 분석을 통해 화석연료 연소에서 발생하는 이산화탄소 배출량이 감소했음에 초점을 맞추었다.

본 연구에서는 코로나-19 확산을 막기 위해 중국에서 시행된 사회적 거리두기 조치로 인한 인위적 메탄 배출량의 감소가 대기 중 메탄 농도에 미치는 영향을 안면도 지상관측 자료를 이용하여 파악하고자 한다. 이를 위해 안면도 지점의 대기 중 메탄 농도 자료에서 배출원의 기여도를 나타내는 메탄 증가분을 산정하였다. 관측 시각별로 메탄 증가분에 주로 영향을 미친 기원 지역을 WRF-STILT 모델을 활용한 지역별 풋프린트 (footprint) 분석을 통해 구분하였다. 그리고 각 지역에서 기원한 메탄 증가분이 코로나 봉쇄 기간 전후로 유의미한 변화를 나타냈는지 분석하였다.

제 2 장 연구 방법

제 1 절 연구 범위

본 연구에서는 코로나 봉쇄로 인한 인위적 활동의 변화가 대기 중 메탄 농도에 미친 영향을 이해하기 위해, 중국과 한국의 각 지역에서 기원하여 안면도 기후변화감시소에서 관측된 메탄 증가분이 코로나 봉쇄 시기 전후 변화한 양상을 분석하였다.

1. 연구 기간

연구 기간은 2018년, 2019년, 2020년 각 연도의 2월부터 3월까지이다. 2020년 2월에서 3월은 중국에서 사회적 봉쇄 조치가 시행되어 인위적 메탄 배출량이 감소했을 것으로 예상되는 기간이다. 2020년 1월 23일 중국 후베이성 우한시에서 최초로 봉쇄 조치가 시행된 이후, 중국 각 지역에서도 외출 제한 등의 코로나19 감염 확산 방지 조치가 3월 또는 그 이후까지 시행되었다. 이에 따라 또 다른 온실가스인 이산화탄소의 배출량은 전년에 비해 2월은 -18.4%, 3월은 -9.2% 감소한 것으로 나타났다 (Liu et al, 2020)

2018년, 2019년 2월과 3월은 이와 대조되는 기간으로 평년 수준의 일반적인 배출 활동을 나타내는 시기이다. 2018년과 2019년 전체 기간 중에서도 대기 중 메탄의 계절적 변동 조건을 동일하게 고려하기 위해 코로나 봉쇄 시기와 일치하는 2월부터 3월을 대조 기간으로 선정하였다. 그림 4에서 코로나 봉쇄 기간은 회색으로 칠해진 기간, 대조 기간은 노란색으로 칠해진 기간이다.

2. 연구의 공간적 범위

본 연구에서는 중국 및 한국의 지역별 메탄 배출 활동의 영향을 알아보기 위해, 안면도 지점에서 관측된 시간별 메탄 증가분 값을 해당 시각 안면도의 공기체가 주로 기원한 지역에 따라 분류하였다. 이때 기원 지역은 지역의 사회경제적 특성 및 봉쇄 기간에 따라 중국 동부, 중국 동북부, 한국으로 나누었다. 각 지역의 지리적 위치는 그림 1에서 확인할 수 있다.

기원 지역 중 중국 동부는 중국 동북부에 비해 인구가 많고 2019년 GDP가 3배 이상 높아 경제 활동이 활발한 지역이다. (Statista, 2022) 인위적 메탄 배출량 또한 동북부 지역에 비해 높게 나타나며 (그림 2), 이 때문에 코로나 봉쇄 조치로 인한 활동 감소 정도가 컸을 것으로 예상되는 지역이다. 반면, 중국 동북부는 중국 동부에 비해 상대적으로 인구 및 경제 활동이 적어 봉쇄 조치에 의한 활동 감소 정도가 상대적으로 적었을 것으로 추정되는 지역이다. 한국은 인구 밀도가 높고 경제 활동은 활발하나 본격적인 사회적 거리두기가 3월 말부터 시행되었기 때문에 본 연구 기간에는 인위적 활동의 변화가 나타나지 않았을 것으로 추정된다. 이처럼 각 연구 지역은 사회경제적 특성, 봉쇄 여부에 따라 서로 다른 인위적 활동 변화 양상을 나타낸다.

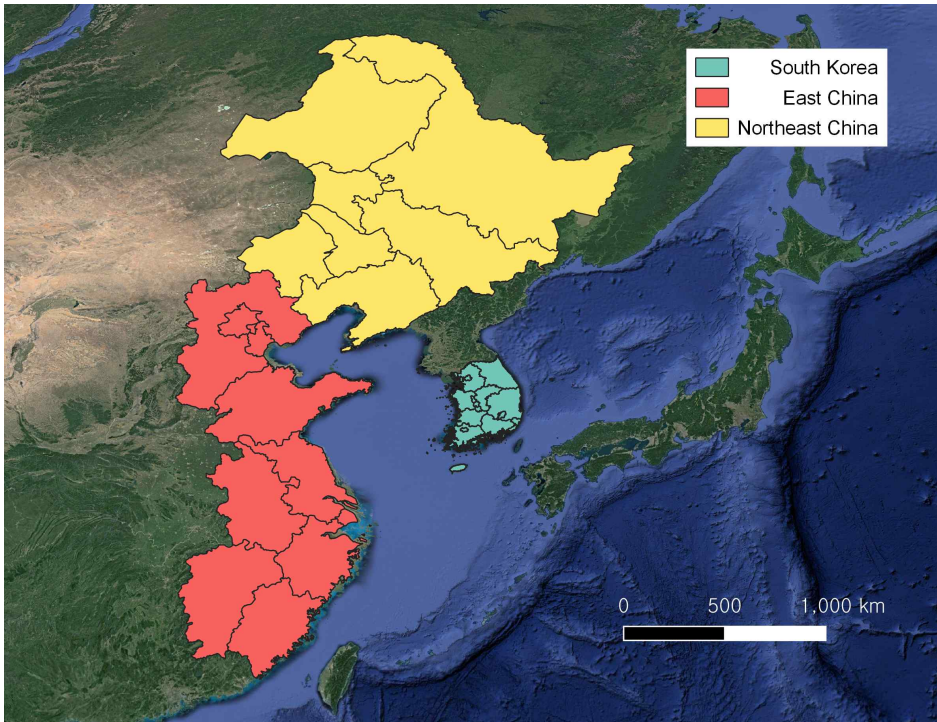


그림 1 한국, 중국 동부, 중국 동북부 지역 분류

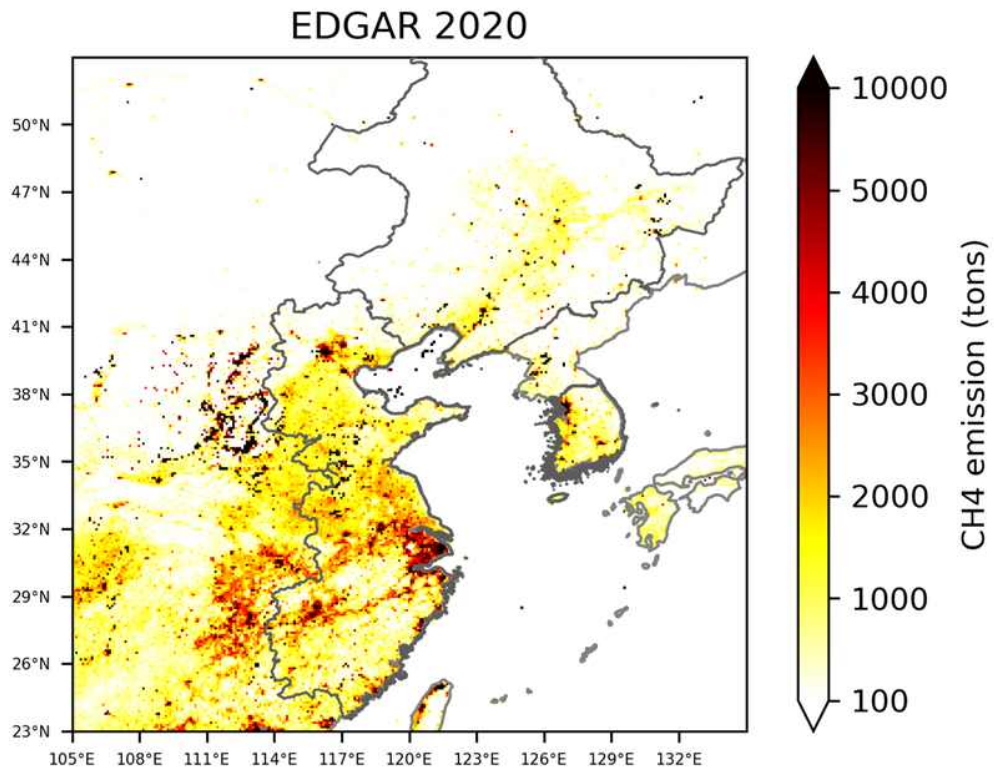


그림 2 EDGARv7.0 (Emissions Database for Global Atmospheric Research) 2020년 한국 및 중국 지역 연간 메탄 배출량

제 2 절 연구 자료

1. 메탄 관측 자료

본 연구에서는 안면도와 미나미토리시마 두 군데의 지표관측소에서 관측한 대기 중 메탄 농도 자료를 사용하였다. 각 관측소의 위치는 그림 2에서 확인할 수 있다. 중국 및 한국의 인위적 배출이 대기 중 메탄 농도에 미친 영향을 정확히 분석하기 위해서는 대기 중 농도에서 배경 농도를 제거한 메탄 증가분을 계산해야 한다. 본 연구에서는 안면도를 오염원, 미나미토리시마를 배경 대기의 관측값으로 간주하여 중국 및 한국의 인위적 배출이 기여한 메탄 증가분을 산정하였다.

안면도 기후변화감시소는 1999년부터 현재까지 온실가스를 비롯해 반응가스, 강수화학, 대기복사, 성층권 오존 등을 관측하고 있는 WMO/Global Atmospheric Watch (GAW) 지역급 (Regional) 관측소이다. 우리나라 서해안인 위도 $36^{\circ} 32'$, 경도 $125^{\circ} 19'$, 해발고도 47m 지점에 위치한다. 운영 주체는 대한민국 기상청이다. 높이 40m의 주입구 (inlet)에서 유입된 공기의 메탄 농도를 공동 링-다운 분광기기(cavity ring-down spectroscopy, CRDS 2301)를 이용해 5초 간격으로 실시간 측정한다. WMO/GAW 네트워크의 온실가스 표준 척도인 WMO-X2004A 척도에 따라 2주마다 기기를 보정한다 (Kenea et al, 2019; Lee et al, 2022). 안면도의 메탄 농도는 상대적으로 풍속이 높아 잘 혼합된 공기(well-mixed air)를 측정했을 때도 다른 배경 대기 지점의 농도보다 높은 편이다. 이는 안면도의 메탄 농도는 인접한 지역의 배출원뿐만 아니라 아시아 대륙의 배출원으로부터 장거리 수송되어온 공기의 영향을 받기 때문으로 보인다 (Lee et al, 2022). 이 때문에 안면도 관측소는 우리나라 및 동북아시아 대륙에서 유입되는 온실가스 및 대기 오염 물질을 감시하는 역할을 수행할 수 있다.

미나미토리시마 WMO/GAW 지구급 (Global) 관측소에서는 대기 중 메탄을 비롯하여 이산화탄소, 일산화탄소, 수소불화탄소 등 대기 구성 요

소를 1994년부터 현재까지 관측하고 있다. 태평양 한가운데인 위도 $24^{\circ} 17'$, 경도 $153^{\circ} 58'$ 지점에 있으며 해발고도 높이는 7.1 m이다. 운영 주체는 일본 기상청 (JMA, Japan Meteorological Agency)이다. 안면도 지점과 마찬가지로 공동 링-다운 분광기기 (WS-CRDS, Picarro, G2301)를 이용해 메탄 농도를 측정하며 정확도는 0.26 ppb이다 (Tsuboi et al., 2013). 본 연구에서는 미나미토리시마의 관측 자료 중 국지적인 배출원 또는 흡수원의 영향을 받지 않은 배경 농도 자료만을 이용하였다.

안면도와 미나미토리시마의 메탄 관측 자료는 모두 WMO WDCGG (World Data Centre for Greenhouse Gases, <http://ds.data.jma.go.jp/gmd/wdcgg/>)에서 제공하는 1시간 주기 자료를 사용하였다.

그림 4는 2018년부터 2020년까지 안면도와 미나미토리시마에서 관측한 대기 중 메탄 농도의 시계열을 나타낸 것이다. 얇은 실선은 시간별 메탄 관측 농도, 굵은 실선은 일별 메탄 관측 농도에 Thoning et al. (1989)가 제안한 부드러운 곡선 맞춤 (Curve Smoothing and Fitting) 방법을 적용하여 결측을 보완하고 잡음 (Noise)을 제거한 것이다. 미나미토리시마의 메탄 농도가 안면도의 메탄 농도보다 대부분의 관측 시각에서 낮게 나타난다. 또한, 여름철에 메탄 농도가 감소하는 북반구 중위도 지역의 계절적 변동이 안면도 관측 자료와 미나미토리시마의 관측 자료에서 유사하게 나타난다. 이를 바탕으로 미나미토리시마가 안면도의 배경 대기 지점으로 적합하다고 판단하였다.

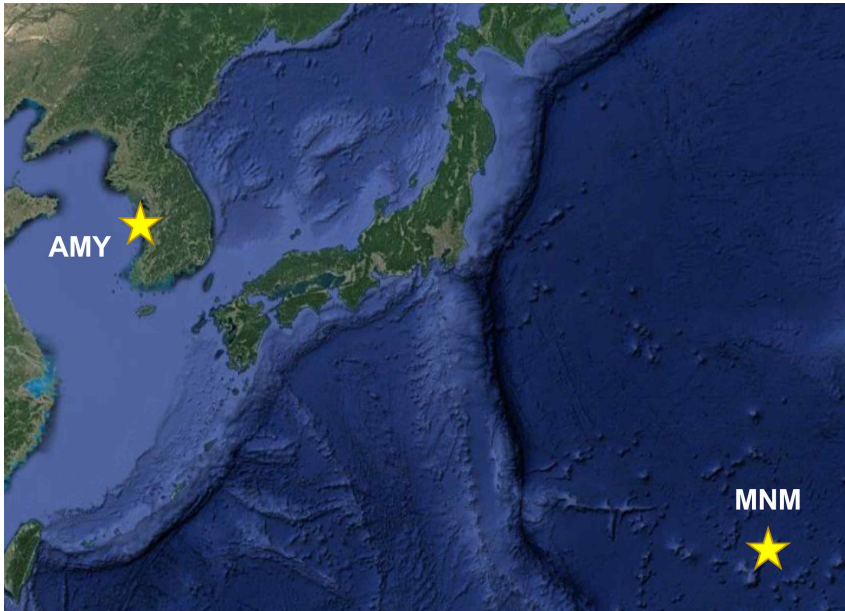


그림 3 안면도 관측소 및 미나미토리시마 관측소의 위치

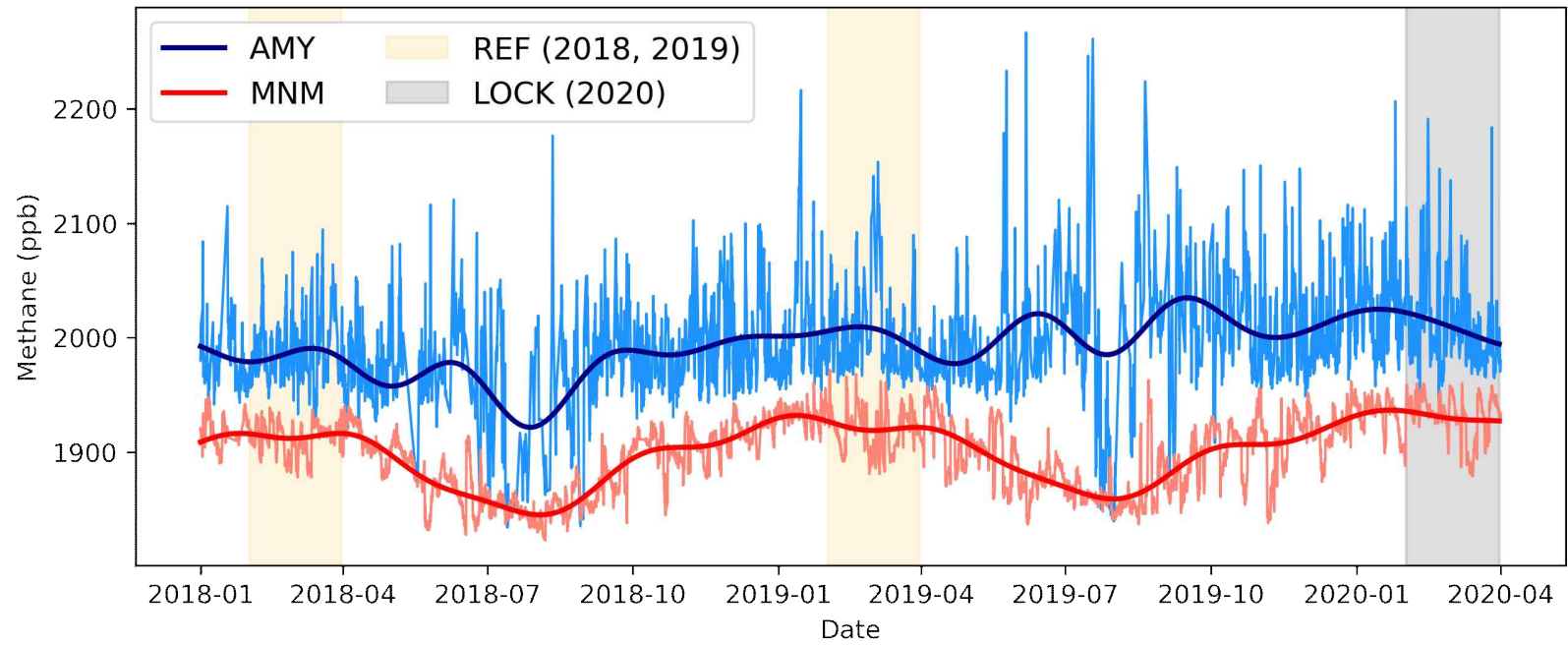


그림 4 안면도 지점과 미나미토리시마 지점의 대기 중 메탄 농도 시계열

2. 기상 관측 자료

안면도 인근 대기의 정체 여부를 판단하기 위한 풍속 자료로 방재기상관측망 자동기상관측장비 (AWS, Automated Weather System) 안면도 지점 관측 자료를 이용하였다. 자동기상관측장비의 안면도 지점 관측은 대기 중 메탄 농도를 관측하는 곳과 동일한 안면도 기후변화 감시소 (위도 36° 32', 경도 125° 19')에서 이루어진다. 풍속 자료는 기상청 자료 개방 포털에서 제공하는 1시간 간격 자료를 이용하였다. (<https://data.kma.go.kr/>)

제 3 절 연구 방법

1. 시간별 안면도 메탄 증가분 (ΔCH_4) 산출

중국 및 한국의 인위적 배출이 대기 중 메탄 농도에 미친 영향을 정확히 분석하기 위해서는 대기 중 농도에서 배경 농도를 제거한 메탄 증가분을 계산해야 한다. 본 연구에서는 안면도를 오염원, 미나미토리시마를 배경 대기의 관측값으로 간주하여 중국 및 한국의 인위적 배출이 기여한 메탄 증가분을 산정하였다. 본 연구 방법은 Sim et al. (2016)이 안면도 관측 자료를 활용해 코로나 봉쇄 전후 중국에서 기원한 이산화탄소 증가분의 감소를 분석하기 위해 이용한 방법론에 기초한다.

먼저 안면도 메탄 관측 자료 중에서 풍속 및 관측 시각을 기준으로 광역적인 메탄 플럭스의 영향을 받은 자료만 선별하였다. 선별 기준은 본 연구와 같이 안면도 지역을 대상으로 한 Yun et al. (2020)의 연구에서 수행된 방법을 참고하였다. 구체적으로 풍속이 3.0 m/s 이상이며 현지 시각 오후 12시에서 17시 사이에 관측된 메탄 농도 자료만을 이용하였다. 오후 12시에서 17시는 대기경계층고도 (Planetary Boundary Layer Height, PBLH)가 최대가 되어 대기확산이 활발하게 이루어질 것으로 기대되는 시간대이다. 해당 조건을 만족하지 못할 때에 관측된 농도 자료는 넓은 범위의 지역보다는 관측소에 인접한 국지적인 메탄 배출원 또는 흡수원의 영향을 주로 받았을 것이라 간주하여 분석 대상에서 제외하였다.

미나미토리시마의 배경 농도는 다음과 같은 방법으로 계산하였다. 우선 미나미토리시마 관측 자료의 품질 관리 표시 (QC Flag)에 따라 여타 오염원의 영향을 받지 않은 배경 농도 관측 자료만 선별한다. 선별한 시간당 메탄 농도 자료를 일별로 평균한다. 그리고 일별 메탄 시계열 자료에 Thoning et al. (1989)가 제안한 부드러운 곡선 맞춤 (Curve Smoothing and Fitting) 방법을 적용하여 결측치를 보완하고 잡음

(Noise)를 제거하였다. 이 결과 얻어진 미나미토리시마의 일별 메탄 시계열 자료를 안면도 지점 대기 중 메탄의 배경 농도로 가정하였다.

중국 및 한국의 인위적 배출량으로 인한 메탄 증가분은 시간별 안면도 메탄 농도와 해당 날짜의 미나미토리시마 배경 메탄 농도의 차로 정의하였다. 그림 3은 안면도와 미나미토리시마의 메탄 관측 자료를 이용하여 메탄 증가분을 계산하는 과정을 나타낸 흐름도이다.

$$\Delta CH_4 = CH_{4,AMY} - CH_{4,MNM}$$

본 연구에서는 코로나 봉쇄 기간 (2020년 2월, 3월)과 봉쇄 이전 기간 (2018년, 2019년 2월, 3월) 동안의 ΔCH_4 를 계산하고, 각 기간별 평균 ΔCH_4 를 분석하여 코로나 봉쇄로 인한 인위적 활동량의 변화가 메탄 농도에 미친 영향을 조사하였다.

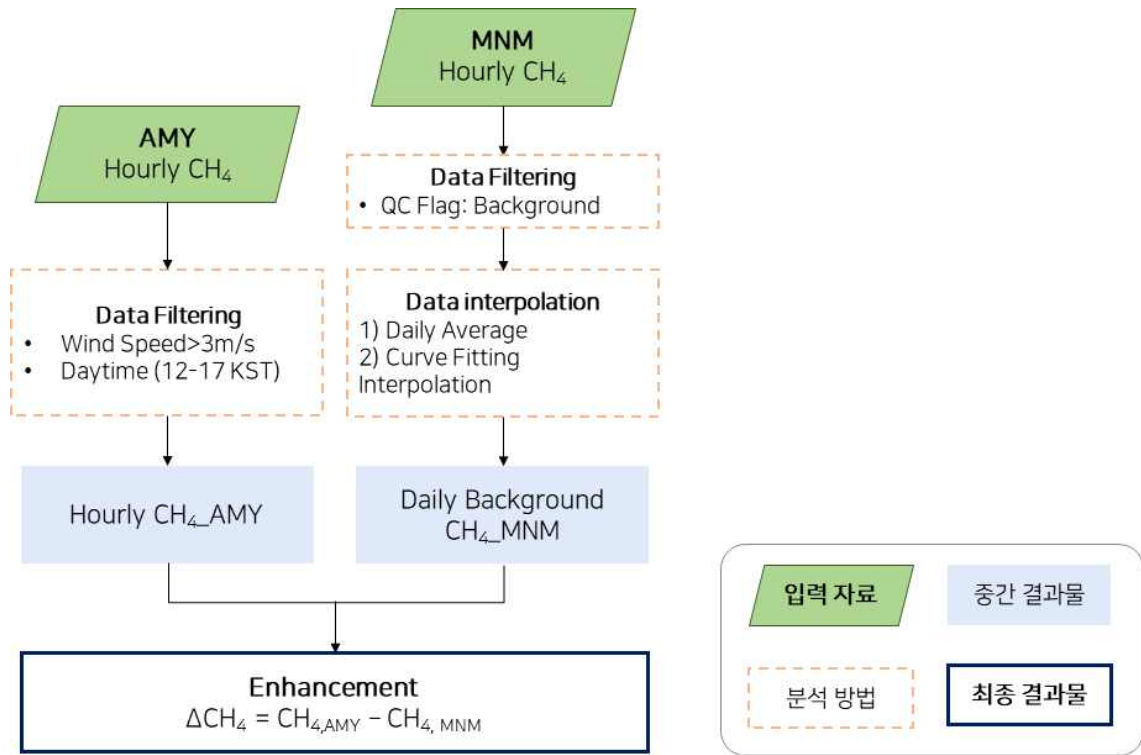


그림 5 메탄 증가분 계산 과정 흐름도

2. 시간당 메탄 증가분의 기원 지역 분류

본 연구에서는 시간당 관측된 메탄 증가분이 주로 기원한 지역을 구분하기 위해 WRF-STILT 모델링의 2차원 풋프린트 (footprint) 분석을 수행하였다. 풋프린트는 단위 표면의 메탄 플럭스가 관측지의 메탄 농도에 영향을 미치는 민감도 (sensitivity)를 말하며, 단위는 [ppb ($\mu\text{mol-1m}^2\text{s}$)]이다. 따라서 특정 지역의 풋프린트 값이 높으면 해당 지역의 메탄 플럭스가 안면도에서 관측한 메탄 농도에 미친 영향이 크다고 간주할 수 있다. STILT 모델은 라그랑지안 입자 확산 모델에 기반하여 수용지 (receptor), 즉 본 연구에서는 안면도 지점에 도달한 입자의 기원 지역을 추적하여 풋프린트를 도출한다 (Lin et al., 2003). STILT 모델은 여러 기상 예측 모델을 통해 구동할 수 있으며 본 연구에서는 Weather Research and Forecasting (WRF) Version 3.9.1 수치 모델을 이용하였다 (Skamarock and Klemp et al., 2008).

입력 기상장으로 활용된 WRF Version 3.9.1 수치 모델의 구체적인 모의 방법은 Sim S. et al. (2016)을 참조하였다. 본 연구에서는 단방향 등지 격자 기법 (one-way nesting)을 이용하였는데, 이는 저해상도 공간 규모의 모델을 측면 경계 조건으로 이용하여 고해상도 공간 규모의 기상장을 모의하는 기법이다. 위도 $103^{\circ}\text{E} - 138^{\circ}$, 경도 $20^{\circ} - 51^{\circ}$ 의 공간 범위에 대해 81km 공간 해상도 (격자 수: $48 \times 59 \times 40$)의 격자를 구성하여 초기 영역 (outer domain)으로 설정하고, 이를 기준으로 27km의 공간 해상도의 등지 격자 (격자 수: $109 \times 139 \times 40$)를 구성하였다. 등지 격자의 공간 해상도가 높아질수록 모의의 정확도가 높아진다는 선행 연구에 따라 (김진영 외, 2015; 안재호, 2015; Solbakken et al., 2021), 해상도를 9km, 3km로 설정한 분석을 추가로 수행하였다. 다만 본 연구에서 등지 격자 해상도의 향상은 결과에 큰 차이를 가져오지 않았다. 이는 특정 지역의 영향이 다른 지역에 비해 월등히 클 때만 해당 지역 기원으로 관측값을 분류했기 때문에, 세부적인 기상장 변화가 최종적인 지역 기원 분류 결과에 큰 영향을 미치지 못했기 때문이다. 도출된 풋프린트 값에 따른 기원 지

역 분류의 구체적인 기준은 후술한다.

WRF 모델의 경계 조건으로는 National Centers for Environmental Prediction (NCEP)에서 6시간 간격, $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 수평 간격으로 제공하는 Global Forecast System (GFS) 재분석 자료를 이용했다. WRF 모델의 물리화 방안으로는 WRF single-moment 6-class (WSM6) microphysics scheme (구름 내 미세물리 모수화) (Hong and Lim 2006), Yonsei University (YSU) scheme (대기경계층 모수화) (Hong et al, 2006), rapid radiative transfer model (RRTMG) shortwave and longwave schemes (단파 및 장파복사 모수화) (Iacono et al 2008), Kain-Fritsch Scheme cumulus parameterization (적운 모수화) (Kain 2004), Community Land Model version 4 (지표면 모수화) (CLM4) (Oleson et al 2010) 방안을 이용하였다.

WRF 모델에 의해 구동된 STILT 모델은 각 관측 시각에 안면도에 도달한 입자 300개를 지난 48시간 동안에 대해 모의하여 역추적하였다. 총 48시간 동안에 대해 1시간 간격으로 공간 격자별로 풋프린트를 도출하고 이를 평균하였다. 그리고 한국, 중국 등 지역 경계 내에 포함되는 격자들의 지난 48시간 평균 풋프린트의 총합을 계산하고 이를 바탕으로 시간별 메탄 농도의 주된 기원 지역을 분류하였다.

특정 지역 경계 내의 48시간 풋프린트 합이 다른 지역의 풋프린트 합보다 월등히 클 때 해당 관측 자료의 기원을 해당 지역으로 분류하였다. 중국의 풋프린트 합이 한국의 풋프린트 합의 2배보다 큰 경우 중국 기원으로, 그 반대의 경우에는 한국 기원으로 분류하였다. 중국 기원 자료의 경우 지역 경계에 따라 세부적인 기원을 중국 동북부와 중국 북부로 추가 분류하였다. 마찬가지로 중국 동북부 풋프린트의 합이 중국 북부 풋프린트의 합보다 2배 이상 큰 경우 중국 동북부 기원으로 분류하였으며, 그 반대의 경우 중국 북부 지역에서 기원한 것으로 분류하였다.

3. 평균 차이 검정

코로나 봉쇄 이전과 이후 평균 메탄 증가분 농도에 유의미한 차이가 있는지 판단하기 위해 맨-휘트니 U 검정(Mann-Whitney U Test)을 이용하였다. 맨-휘트니 검정법은 윌콕슨 순위 합 검정(Wilcoxon rank sum test)이라고도 불리며, 서로 다른 두 집단 평균치의 차이를 검정하는 통계적 검정 방법이다. 일반적으로 자료의 평균을 비교하기 위해 사용하는 T-검정을 사용하기 위해서는 집단 간에 독립성이 있고, 집단의 자료의 정규성을 만족해야 한다는 전제가 있다. 맨-휘트니 검정 U 방법은 자료의 독립성이 만족 되어야 한다는 점은 T-검정과 같다. 그러나 자료의 수가 적거나 정규성을 만족하지 못할 때 평균 차이를 검정하기 위해 사용하는 비모수(nonparametric)적인 검정 방법이라는 점이 T-검정과 다르다 (McKnight et al., 2010).

본 연구에서는 코로나 전후의 일별 메탄 증가분 자료를 비교하고자 한다. 시간별 메탄 증가분 자료는 자기상관성(autocorrelation)이 있어 독립성을 만족하지 않지만, 이를 날짜별로 평균함으로써 자기상관성을 해소하였다 (Ebisuzaki et al., 1997; Wang et al., 2013). 그러나 일별 평균을 함으로써 자료의 숫자가 적어지고 또한 그 분포가 정규성을 만족하지 않게 되었다. 이에 자료의 독립성이 있으나 정규 분포를 따르지 않을 때 사용할 수 있는 맨-휘트니 U 검정법을 선택하였다. 본 연구에서는 코로나 전후의 메탄 증가분 평균이 95% 확률로 유의미한 차이가 있을 때 ($p\text{-value} < 0.05$) 코로나 봉쇄로 인한 메탄 증가분의 변화가 야기되었다고 판단하였다.

제 3 장 연구 결과 및 토의

제 1 절 한국과 중국 기원 일별 메탄 증가분

그림 6과 7은 2018년, 2019년, 2020년 2월에서 3월 동안 관측된 중국과 한국 기원 메탄 증가분 관측값의 일별 시계열을 나타냈다. 각 일자의 시간별 메탄 증가분의 최소, 최대 범위를 직선으로 나타냈으며 각 직선의 중간에 위치한 점은 일별 메탄 증가분 평균을 나타낸다. 회색으로 배경이 칠해진 기간은 2020년 2월~3월로, 코로나 봉쇄가 시행된 기간을 나타낸다. 코로나 봉쇄 기간과 봉쇄 이전 기간에 각각 그어진 점선은 각 기간 중 메탄 증가분의 최소, 최대 범위를 나타낸다.

한국과 중국에서 각각 기원한 메탄 증가분이 관측된 일수를 비교하면 중국 기원이 53일, 한국 기원이 36일 관측되었다. 이는 안면도 지점이 한반도 내륙뿐만 아니라 중국 대륙에서 유입된 오염물질의 영향을 빈번하게 받음을 보여준다.

그림 6에서 중국 기원 메탄 증가분의 시계열을 살펴보면, 봉쇄 이전인 2018년에서 2019년에 비해 2020년의 증가분의 변동 폭이 다소 작아지고 농도도 낮아졌음을 확인할 수 있다. 코로나 봉쇄 이전 시간별 메탄 증가분의 최솟값은 50.00ppb, 최댓값은 128.28ppb로 나타났다. 봉쇄 기간 시간별 메탄 증가분의 최솟값은 32.05ppb, 최댓값은 101.7ppb이다. 봉쇄 이전과 비교하면 봉쇄 기간 메탄 증가분의 최솟값, 최댓값이 모두 감소하였다.

그림 7에서는 한국 기원 메탄 증가분의 시계열을 확인할 수 있다. 중국 기원 메탄 증가분의 변화와 달리, 한국 기원 증가분은 변동 폭이 다소 작아지기는 했으나 뚜렷한 농도 증가 또는 감소 양상을 확인할 수 없다. 한국 지역에서 기원한 시간별 메탄 증가분의 봉쇄 이전 최솟값은 12.40ppb, 최댓값은 145.0ppb이다. 봉쇄 기간 시간별 메탄 증가분의 최솟값은 31.00ppb, 최댓값은 140.91ppb이다. 봉쇄 이전보다 봉쇄 동안 메탄

증가분의 최솟값은 증가하였으며, 최댓값은 이전과 이후 모두 140ppb 이상으로 큰 차이가 나타나지 않았다.

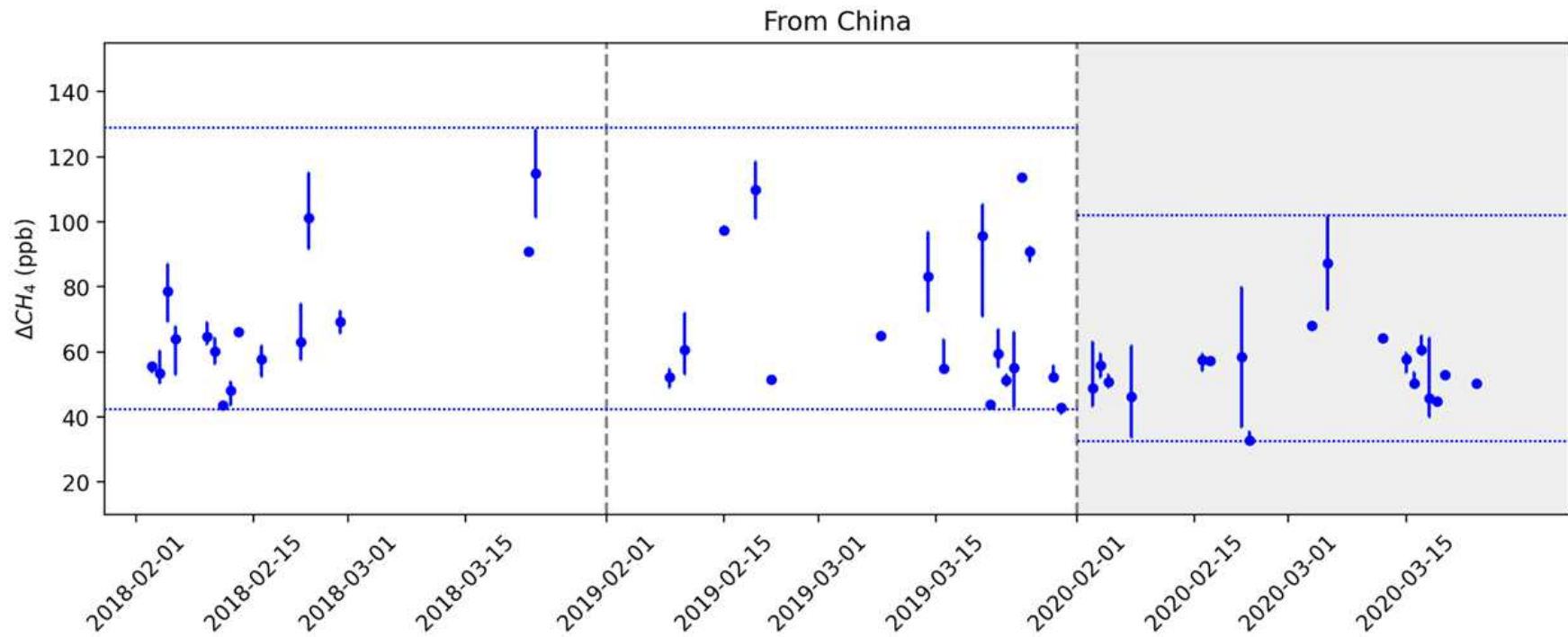


그림 6 중국 기원 메탄 증가분 시계열

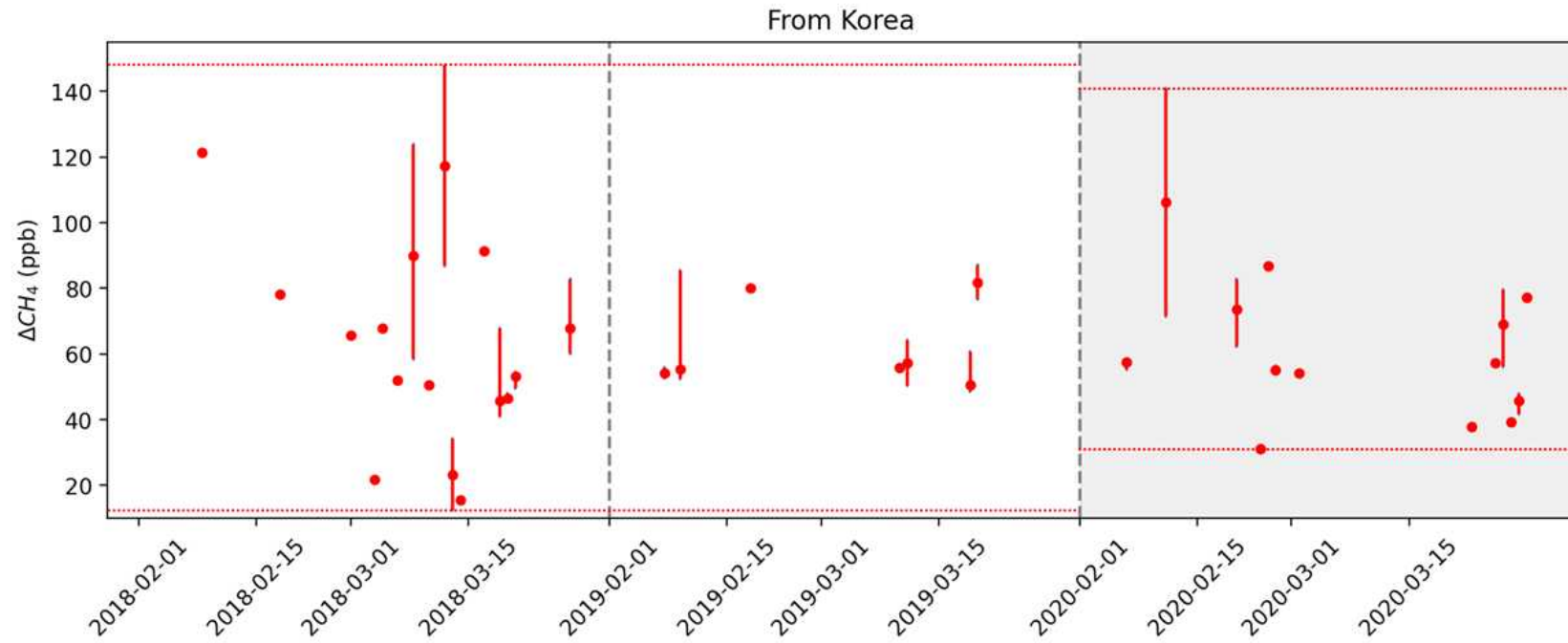


그림 7 한국 기원 메탄 증가분 시계열

제 2 절 한국과 중국 기원 메탄 증가분의 코로나 봉쇄 전후 변화

1. 한국 및 중국 지역 기원 메탄 증가분 변화

그림 5와 그림 6은 각각 한국과 중국의 코로나 봉쇄 이전 연도와 코로나 봉쇄 시행 연도 2월~3월의 메탄 증가분 평균 변화를 나타낸다. 각 기간의 메탄 증가분 평균은 시간당 메탄 증가분 산정값을 일별로 평균한 후, 각 기간의 일별 메탄 증가분 값들을 다시 평균하여 계산하였다. 이와 같은 과정을 거친 것은 자료 선별 및 기원 분류 과정을 통해 최종적으로 산출된 시간당 메탄 증가분 값의 개수가 날짜마다 달라, 관측 자료 수에 따라 특정 일자의 메탄 농도가 전체 평균에 과대 혹은 과소 반영될 여지를 줄이기 위해서이다. 또한, 시간별 메탄 증가분 관측 자료가 갖는 자기상관성을 일별 평균을 통해 제거하여 통계적인 평균 차이 검정에도 용이하게 하는 효과가 있다. 각 그래프의 막대 위 검은 숫자는 해당 기간, 지역의 일별 농도 평균을 나타낸다. 막대 안 하얀 숫자는 해당 기간, 지역에서 관측된 일별 메탄 증가분 자료의 수를 나타낸다. 오차 막대 (error)는 95% 신뢰구간을 나타낸다.

그림 5에서 나타내는 한국 기원 메탄 증가분의 경우, 중국 지역에서 코로나 봉쇄가 없었던 2018, 2019년 2~3월의 증가분 평균이 63.41ppb, 코로나 봉쇄가 있었던 2020년 2~3월 증가분 평균이 60.66ppb로 코로나 봉쇄 이후 메탄 증가분이 약 3ppb가량 감소하였다. 그러나 맨-휘트니 U 통계 검정 결과 유의확률 p 값은 0.41로 두 집단 간에 유의미한 평균 차이가 없는 것으로 판단된다. 즉, 한국 기원 메탄 증가분은 중국의 코로나 봉쇄 전후 유의미한 변화가 없었다.

이는 연구 기간 동안 한국에서는 봉쇄 조치가 시행되지 않아 인위적 배출량이 이전 연도 보다 줄어들지 않았기 때문으로 보인다. 한국의 사회적 거리두기 정책이 본격적으로 시행된 것은 2020년 3월 말 이후로 본

연구에서 초점을 맞춘 기간인 2020년 2월~3월과 어긋난다. 그 때문에 연구 기간인 2020년 2월~3월에 한국의 인위적 배출 활동 수준은 평년과 유사했을 것이며, 따라서 대기 중 메탄 농도 역시 크게 변화하지 않은 것으로 보인다.

이러한 경향이 일시적인 사건에 영향을 받은 것인지 또는 해당 기간의 일관적인 경향인지 확인하기 위해, 2월과 3월로 기간을 나누어 각각 평균 변화를 살펴보았다. 메탄 증가분은 2월과 3월에 각각 10ppb, 4ppb 가량씩 소폭 감소하였다. 그러나 이러한 감소는 통계적으로 유의미한 차이로 볼 수 없다 (표 1). 따라서, 인위적 배출 활동량 변화가 없어 메탄 증가분 변화가 없었다는 양상을 전체 연구 기간에 대해 일관적으로 확인할 수 있었다.

한편, 그림 5에서 확인할 수 있는 중국 기원 메탄 증가분의 경우 2018년, 2019년의 평균 증가분이 70.07ppb에서 2020년 56.09ppb로 감소하였다. 맨-휘트니 U 통계 검정 결과 유의확률 p 값은 0.015로 95% 이상 신뢰 수준에서 유의미한 감소임을 확인할 수 있다. 중국은 한국에 비해 코로나-19 감염이 이른 시기에 확산하여 2020년 2~3월에 고강도 사회경제적 봉쇄 정책을 시행하였다. 이로 인해 석탄 채굴 활동, LNG 등의 연료 연소 등 인위적 활동이 제한되고 메탄 배출량이 감소했을 것으로 추정되며, 그 영향이 메탄 증가분 감소의 원인이 된 것으로 보인다.

한국 기원 메탄 증가분 분석과 마찬가지로 메탄 증가분의 감소가 전체 연구 기간에 걸쳐 나타난 일관적인 경향인지 확인하였다. 분석 기간을 2월과 3월로 나누어 메탄 증가분 변화를 그림 5에 나타냈다. 2월과 3월을 나누어 평균 차이를 분석했을 때도 마찬가지로 코로나 봉쇄 이전에 비해 메탄 증가분이 유의미하게 감소한 것으로 나타난다 (표). 따라서 전체 봉쇄 기간 동안 인위적 활동 감소로 인한 메탄 증가분 감소가 일관된 경향으로 나타남을 확인할 수 있다.

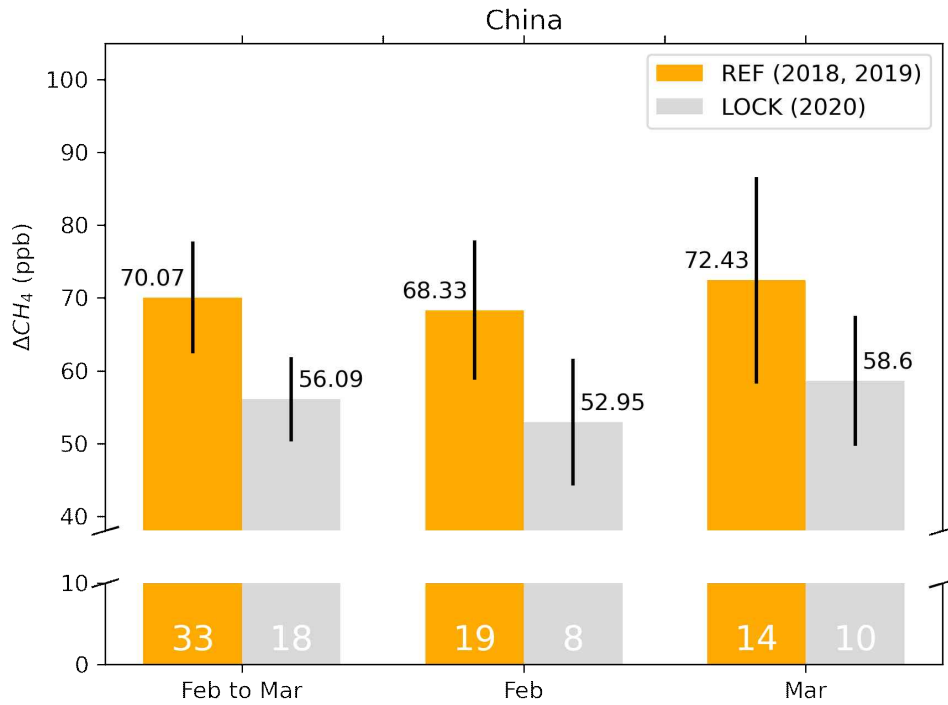


그림 8 중국 기원 메탄 증가분의 코로나 봉쇄 전후 변화

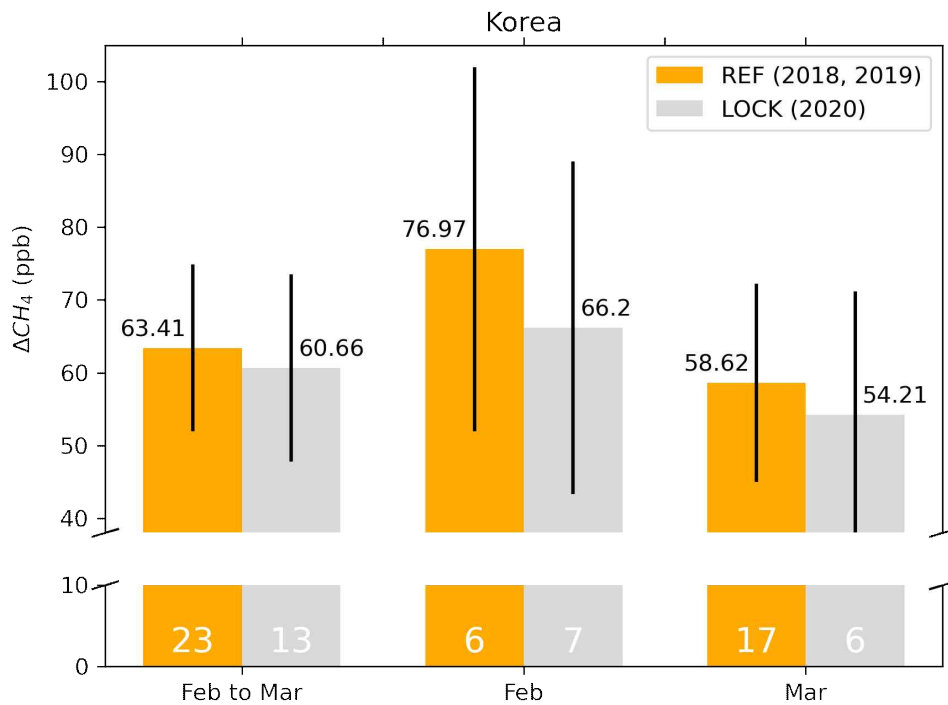


그림 9 한국 기원 메탄 증가분의 코로나 봉쇄 전후 변화

	전체 기간 (2-3월)	2월	3월
한국	0.400	0.216	0.350
중국	0.012	0.026	0.093

표 1 한국과 중국 기원 메탄 증가분의 코로나 전후 평균 차이 검정 결과

2. 중국 동부 및 동북부 지역 기원 메탄 증가분 변화

앞서 제2절 1장에서 중국 지역에서 기원한 메탄 증가분이 코로나 봉쇄 이후 유의미하게 감소한 것을 확인하였다. 구체적인 지역별 메탄 증가분 변화 양상을 살펴보기 위해 중국 지역을 중국 동부와 중국 동북부 지역으로 나누어 각 지역에서 기원한 메탄 증가분의 변화를 분석하였다. 그림 11은 코로나 봉쇄 이전 기간과 코로나 봉쇄 기간 중 중국 동부 및 동북부 지역 기원 일별 메탄 증가분의 평균을 나타낸다. 그림 9, 10과 마찬가지로 각 막대그래프 위의 숫자는 각 기간 및 지역별 메탄 증가분의 평균 농도를 나타내며, 오차 막대는 95% 신뢰구간을 표시한다. 각 막대그래프 안의 흰색 숫자는 각 기간 및 지역별로 관측된 일별 메탄 농도 자료의 숫자이다.

먼저 중국 동부에서 기원한 메탄 증가분의 경우, 코로나 봉쇄가 없었던 2018, 2019년 2~3월의 평균 증가분이 78.37ppb, 코로나 봉쇄가 있었던 2020년 2~3월의 평균 증가분이 51.22ppb이다. 봉쇄 이후 증가분은 약 27ppb (35%) 감소하였다. 맨-휘트니 U 검정 결과 유의확률 p 값은 0.005로 이는 유의미한 감소임을 확인할 수 있다.

한편 중국 동북부에서 기원한 메탄 증가분의 경우, 코로나 봉쇄가 없었던 2018, 2019년 2~3월의 평균 증가분이 62.02ppb, 코로나 봉쇄가 있었던 2020년 2~3월의 평균 증가분이 57.02ppb이다. 봉쇄 이후 메탄 증가분은 5ppb (8%) 감소하였다. 그러나 맨-휘트니 U 검정 결과 유의확률 p 값은 0.233으로, 유의미하지 않은 감소였음을 확인할 수 있다.

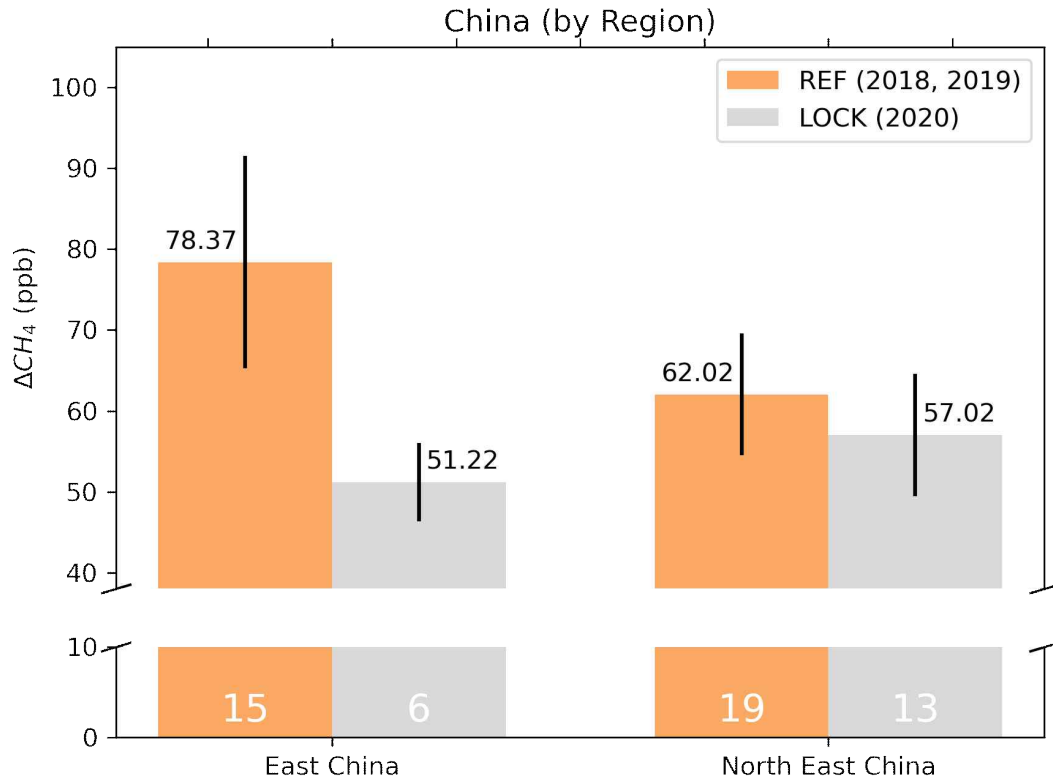


그림 10 중국 동부와 중국 동북부 기원 메탄 증가분의 코로나 봉쇄 전후 변화

	중국 동부	중국 동북부
P-값	0.005	0.233

표 2 중국 동부와 중국 동북부 기원 메탄 증가분의 코로나 전후 평균 차이 검정 결과

제 3 절 코로나 봉쇄 전후 중국의 메탄 배출 활동 변화

1. 중국의 메탄 배출 및 흡수

코로나 봉쇄 기간 중국 기원 메탄 증가분 감소에 영향을 미친 요인을 파악하기 위해서는 중국의 메탄 배출 및 흡수 현황을 이해할 필요가 있다. 나아가 각 메탄 배출원 및 흡수원이 봉쇄로 인해 변화한 양상을 파악하고자 한다.

중국의 메탄 배출은 주로 에너지 산업과 농업 부문에서 발생한다. 그림 11은 중화인민공화국 국가발전개혁위원회 (NDRC, National Development and Reform Commission)에서 산정한 부문별 메탄 배출량을 나타낸 것이다. 이에 따르면 중국은 2014년 총 55.292Mt의 메탄을 배출했다. 가장 큰 비중을 차지하는 배출원은 에너지 부문으로 25.757 Mt (44.8%)를 배출했으며, 이어 농업 부문이 22.245Mt (40.2%), 폐기물 부문이 6.564Mt (11.9%), 산림과 기타 토지 이용 (LULUCF, Land Use-Land Use Change and Forestry) 부문이 1.72Mt (3.1%), 산업 부문이 6kt 순으로 많은 양의 메탄을 배출했다 (NDRC, 2018). 여러 선행 연구에서도 산정 방법 및 시기에 따라 구체적인 값에는 조금씩 차이가 있으나 마찬가지로 중국의 주된 메탄 배출원은 에너지 산업, 축산업, 벼 재배 순인 것으로 나타났다 (Huang et al., 2019; Peng et al., 2016; Gong and Shi, 2021).

한편, 대기 중 메탄의 가장 주요한 흡수원은 OH기와의 반응으로 인한 대기 중 분해이며 그 외에 메탄영양체 (methanotrophic) 박테리아로 인한 토양에서의 흡수 등이 있다 (Saunois et al., 2020). 중국은 연간 8 Tg의 메탄이 OH기와의 반응, 2 Tg의 메탄이 토양 흡수를 통해 흡수되는 것으로 추산된다 (Kirschke et al., 2013). 다만 OH기와 반응으로 인한 메탄 흡수의 경우, 반응성이 높은 특성으로 인해 반응물을 정량화하고 공간 분포를 파악하는 데 어려움이 있다. 이 때문에 메탄 흡수 반응의 시공간적 분포를 추정하는 것 역시 불확실성이 크다 (Zhao et al.,

2019). 또한, OH기의 공간적 분포는 전 지구적인 물리화학적 요소와 1년 이상의 장기 수송의 영향을 크게 받는다 (Anderson et al., 2021). 따라서 OH기와의 반응은 단기적인 지역적 농도 변화를 설명하는 데에 적합하지 않다 (Stavert et al., 2022). 한편, 본 연구의 기간인 2월과 3월은 기온과 강수량이 낮아 토양 메탄영양체 박테리아의 흡수량이 미미하다 (Crill et al., 1991; Curry, 2007). 따라서 본 연구에서 나타난 대기 중 메탄 농도의 변화는 OH기 반응, 토양 흡수와 같은 흡수원의 영향이 주요하지 않다고 판단하였다.

이에 본 연구에서는 중국 메탄 배출의 주된 비중을 차지하는 에너지 부문, 농업 부문 배출 활동이 코로나 봉쇄 전후로 어떻게 변화하였는지를 중심으로 논의하고자 한다.

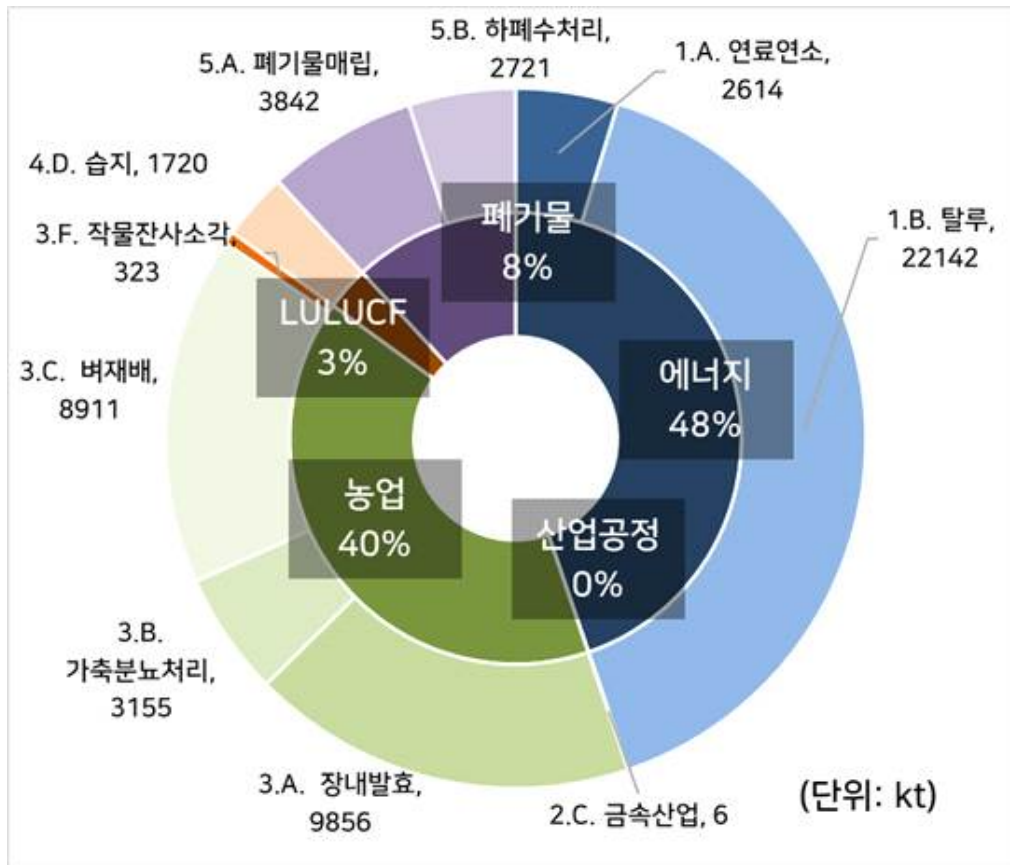


그림 11 2014년 중국 부문별 메탄 배출량

2. 에너지 부문 배출량 변화

에너지 부문은 중국에서 가장 많은 양의 메탄을 배출하는 부문이다. 2014년 기준 에너지 부문 배출의 89%는 탈루로 발생했으며, 이는 주로 석탄 채굴 과정에서 지층에 매장되어 있던 메탄이 대기 중으로 방출되는 것을 가리킨다. 나머지 11%는 연료 연소 부문에서 발생하였다 (NDRC, 2018). 주요 화석연료로는 석탄, 석유, 천연가스 등이 있으며 각각 연소 과정에서 각각 1kg/TJ, 3kg/TJ, 1kg/TJ의 메탄이 배출된다 (IPCC, 2006).

탈루로 인한 메탄 배출은 2020년 2월~3월 코로나 봉쇄로 석탄 생산 활동이 제한됨에 따라 함께 감소한 것으로 추정된다. 고체연료의 탈루는 석탄 채굴 과정에서 발생하는 만큼 배출량이 석탄 산업의 규모에 직접 영향받는다. 2020년 2월, 봉쇄 정책의 일환인 이동금지 조치로 설 연휴를 보내기 위해 이동했던 탄광 노동자들이 탄광 현장으로 복귀하지 못했으며 석탄 생산 활동이 제한되었다. 2월 중반에는 전체 탄광 중 57%만이 석탄 생산이 가능했으며, 3월에는 생산 활동이 일부 회복하여 전체 탄광의 83%가 운영되었다 (Global Data, 2022). 그 여파로 2020년 1분기 중국의 전체 석탄 생산량은 806,311kt로 2018년(819,009kt)과 2019년(913,954kt)에 비해 감소하였다 (IEA, 2022). 그림 12에서 확인할 수 있듯 중국의 연도별 1분기 석탄 생산량은 2017년 이후 조금씩 증가하는 추세였으나 2020년에 이전 연도보다 생산량이 일시적으로 감소하며, 2021년 이후 다시 증가세에 접어드는 것을 확인할 수 있다. 따라서 2020년 2월과 3월에는 코로나 봉쇄 정책의 영향으로 석탄 채굴 활동이 축소되었으며 그 과정에서 발생하는 메탄 탈루량이 감소했을 것으로 유추된다.

고체연료의 탈루 외에 연료 연소 부문에서도 화석연료 수요가 감소함에 따라 배출량이 줄어든 것으로 판단된다. 2020년 1분기 중국의 총에너지 수요는 교통 통제, 산업 시설 가동 중단 등으로 인해 지난해인 2019년 1분기에 비해 7% 감소했다 (IEA, 2020). 우선 교통수단의 주요 에너지원인 석유는 이동 통제로 도로 및 항공 교통량이 감소함에 따라 2020

년 2월과 3월에 전년보다 각각 20%, 33% 수요가 감소했다. 석탄은 2020년 기준 1차 에너지 소비의 56%, 전력 생산의 63%를 차지하는 중국의 최대 에너지원으로 (BP, 2022), 경제 활동 위축과 함께 수요가 감소했다. 총 석탄 소비는 전년보다 8% 감소했으며, 석탄을 이용한 전력 생산은 9% 감소했다. 천연가스 수요는 다른 연료원에 비해 크게 변화하지 않아, 2020년 1월과 2월의 수요가 전년과 비교하면 1%가량 증가했다 (IEA, 2020). 즉, 2020년 코로나 봉쇄로 중국의 교통, 산업, 전력 등의 분야에서 전반적인 에너지 수요가 감소해 연료 연소에서 발생하는 메탄 또한 감소한 것으로 보인다.

연도별 1분기 중국 총 석탄 생산량

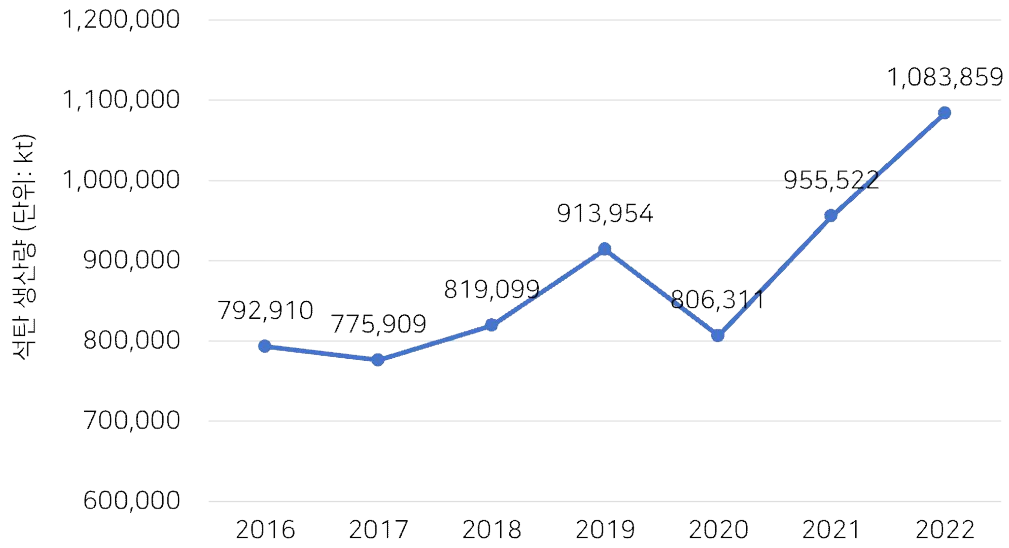


그림 12 2016-2022년 1분기 중국 총 석탄 생산량

3. 농업 부문 배출량 변화

농업 부문에서의 메탄 배출은 주로 장내 발효, 가축 분뇨처리 등의 축산업 활동과 벼 재배 활동에서 발생하며, 중국의 메탄 배출원 중 두 번째로 비중이 크다. 축산업 활동의 경우, 반추동물이 탄수화물을 소화하는 장내 발효 과정과 가축 분뇨가 혐기성 조건에서 저장, 처리되는 과정에서 메탄이 발생한다 (IPCC, 2006). 각각 2014년 중국 농업 부문 배출량의 45%, 14%를 차지한다 (NDRC, 2018). 벼 재배 활동의 경우, 모내기 이후 답수된 논에서 볏짚과 같은 유기물이 혐기적으로 분해되어 메탄이 발생한다 (Aulakh et al., 2001). 2014년 중국 농업 부문 배출량의 41%가 벼 재배에서 기인하였다 (NDRC, 2018).

코로나 봉쇄 기간 축산업 부문의 배출량은 봉쇄 전후 가축 두수가 크게 변화하지 않은 점에 미루어 이전과 유사한 수준이었을 것으로 추정된다. 축산업 부문의 메탄 배출량은 축종별 사육 두수에 비례하여 추산한다. 표 5는 중국의 주요 가축인 소(Cattle), 들소 (Buffalo), 양, 염소, 닭, 오리, 돼지의 2018년부터 2020년까지의 사육 두수를 나타낸다 (FAOSTAT, 2023). 돼지를 제외하고 모든 축종의 두수가 전년보다 6% 미만 범위에서 감소하거나 증가하였다. 돼지의 경우 2019년에 아프리카 돼지 열병이 유행하여 두수가 감소하였다가 (Staff, 2020) 2020년에 사육량이 회복된 것으로 보인다. 이처럼 가축 두수는 가축 전염병 유행과 같은 일시적 사건으로 크게 변동할 수 있으나, 코로나 봉쇄는 이와 크게 관련이 없는 사건이었던 것으로 보인다. 이에 따라 코로나 봉쇄로 인한 축산업 부문의 배출량 변화는 미미했을 것으로 추정된다.

벼 재배로 발생하는 메탄 또한 농경지 면적 변화와 계절적 특성을 고려하였을 때 봉쇄 전후 크게 변화하지 않은 것으로 보인다. 벼 재배로 인한 메탄 배출을 산정하기 위한 기초자료로는 농경지 면적이 활용된다. 중국의 2018년, 2019년, 2020년 경지 (cropland) 면적은 각각 $1356757 km^2$, $1356752 km^2$, $1356741 km^2$ 이다 (FAOSTAT, 2023). 2020년 농경지 면적은 전년보다 $11 km^2$ 감소하였으나 0% 미만의 미미한 비율이며, 이는

농경지 면적이 단기적 봉쇄로 급격히 감소하기 어려운 속성을 반영한다. 더욱이, 2월과 3월은 농경지 메탄 배출량이 적은 시기로 본 연구 기간의 메탄 농도에는 큰 영향을 미치지 않았을 것으로 생각된다. 벼 재배로 인한 메탄 배출은 논이 물에 잠기는 모내기 이후 시점부터 본격적으로 발생해 기온이 높고 강수량이 많은 여름, 식물 성장 시기 (growing season)에 극대화되고, 기온이 낮아지고 추수가 시작되는 가을부터 다시 배출량이 적어진다 (Khalil et al. 1991; Duan et al. 2005). 모내기 이전인 2월, 3월의 경우 다른 계절에 비해 벼 재배로 인한 메탄 배출 비중이 작다 (Gong and Shi, 2021). 따라서, 벼 재배 부문의 메탄 배출은 코로나 봉쇄와 큰 관련이 없으며 안면도 메탄 농도 감소에 큰 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다.

	2018	2019	2020
소	63,417,929	63,540,665	61,170,604
들소	27,118,630	27,338,365	27,247,992
양	161,388,387	163,489,806	173,095,481
염소	135,892,293	137,367,229	133,583,795
닭	5,182,245,000	5,163,900,000	5,196,760,000
오리	695,895,000	683,798,000	679,664,000
돼지	433,709,796	316,030,373	412,135,713

표 5 2018년-2020년 중국 가축 종별 두수 (단위: 마리)

4. 중국의 지역별 에너지 부문 배출 활동 규모

앞서 결과 제2절 2장에서 코로나 봉쇄 이후 중국 동부에서 기원한 메탄 증가분이 감소했으나, 동북부 기원 증가분은 유의미한 차이가 없었음을 확인하였다. 이어 제3절 1~3장에서는 메탄 증가분 감소에 영향을 미친 주요한 배출원이 에너지 부문의 탈루, 화석연료 연소였음을 유추하였다. 이에 지역별로 서로 다른 증가분 변화 양상에 영향을 미친 요인을 파악하기 위해 지역별 에너지 부문 메탄 배출 활동의 특성을 살펴보았다.

먼저 석탄 채굴 과정에서의 탈루와 관련하여 중국 동부와 동북부 지역의 석탄 생산량을 조사하였다. 그림 14는 중국 동부와 동북부 지역에서 2022년 운영 중인 규모 1 Mtpa (Million tonnes per annum) 이상인 석탄 광산 생산 능력 (Coal production capacity)의 합을 나타낸 것이다. 중국 동부의 석탄 생산 능력 합은 총 280Mtpa 이며 중국 동북부의 석탄 생산 능력 합은 95Mtpa 이다. 중국 동부의 생산 능력이 동북부의 생산 능력에 비해 약 2.95배가량 크다 (Global Energy Monitor, 2022). 따라서 봉쇄 정책이 시행되었을 때 석탄 생산 활동에의 타격이 중국 동부 지역에서 더 컸을 것으로 보이고, 이것이 뚜렷한 메탄 증가분의 감소로 이어진 것으로 추정된다.

화석연료 연소량을 나타내는 에너지 수요 또한 중국 동부가 동북부 지역보다 크다. 2019년 기준 중국 동부 지역 성(省)의 석탄, 석유, 천연가스 소비량 총합은 각각 1,520.51 백만 톤, 326.36 백만 톤, 132,950 백만 m³ 이다. 한편, 동북부 지역 주요 성의 석탄, 석유, 천연가스 소비량 총합은 각각 415.84 백만 톤, 124.64 백만 톤, 14,955 백만 m³으로 모든 연료원의 소비량이 동부 지역에 비해 적었다. 또한, 2002년 산업용 석탄 수요의 총합은 동부 지역이 441.0 Mt, 동북부 지역이 84.0 Mt이다 (Cattaneo et al., 2011). 즉, 산업 부문을 비롯한 전반적인 에너지 수요가 동부 지역이 동북부 지역보다 높으며, 봉쇄로 인한 감소 효과가 동부 지역에서 더 크게 나타난 것으로 보인다.

2022년 중국 지역별 석탄 생산 능력 (Coal Production Capacity)

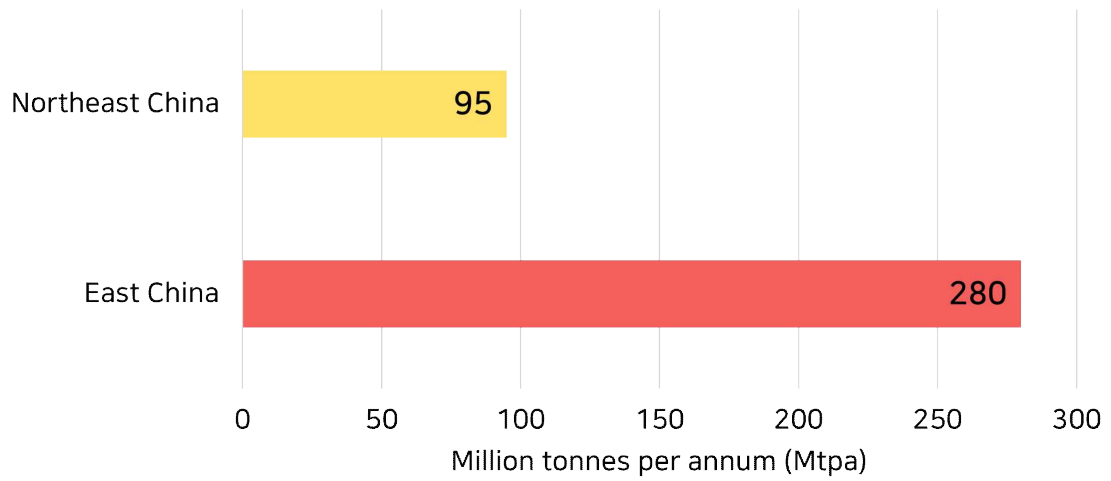


그림 13 중국 동북부와 중국 동부의 2022년 석탄 생산 능력

제 4 장 결 론

본 연구에서는 코로나-19 바이러스의 확산을 막기 위해 시행된 중국의 사회적 봉쇄 조치가 대기 중 메탄 농도에 미치는 영향을 안면도 지상 관측 자료와 대기 모형을 이용하여 분석하고자 하였다. 한국 및 중국 지역의 인위적 메탄 배출이 대기 중 농도에 기여한 양을 산정하기 위해 안면도 메탄 농도에서 배경 대기 지역인 미나미토리시마의 메탄 농도를 제거한 메탄 증가분을 산정하였다. 시간별 메탄 증가분이 주로 기원한 지역을 WRF-STILT 풋프린트 분석을 통해 중국 (동부, 동북부)와 한국으로 구분하였다. 그리고 지역별로 중국의 코로나 봉쇄 기간 (2020년 2월, 3월)과 봉쇄 이전 기간 (2018년, 2019년 2월, 3월)의 메탄 증가분 평균을 비교하여 메탄 증가분의 변화가 나타났는지 판단하였다.

분석 결과 중국에서 기원한 메탄 증가분은 코로나 봉쇄 기간 동안 평년에 비해 13.98ppb (20.0%) 감소한 것으로 나타났다. 특히, 중국 동부에서 기원한 메탄 증가분이 27.15ppb (34.6%) 감소하였으나 중국 동북부에서는 유의미한 감소가 나타나지 않아 지역별로 다른 양상이 나타남을 확인했다. 중국 지역 메탄 배출원 및 흡수원의 특성을 고려할 때, 이는 봉쇄 조치로 인해 석탄 채굴 과정에서의 메탄 탈루가 감소한 영향으로 추정된다. 메탄 증가분이 대폭 감소한 중국 동부는 동북부 지역에 비해 석탄 생산 산업의 규모가 3배 이상 커 봉쇄 조치의 영향을 크게 받았으며, 그 영향이 대기 중 농도 변화에 반영된 것으로 추정된다. 한편, 한국 지역에서 기원한 메탄 증가분은 코로나 봉쇄 기간 동안 평년에 비해 큰 차이가 없었다. 이는 한국의 사회적 거리두기 기간은 2020년 3월 말부터 시작되어 본 연구의 분석 기간과 어긋났기 때문에 인위적 활동량 감소로 인한 효과가 나타나지 않은 것으로 보인다.

본 연구에서는 국가 메탄 배출량을 산정한 문헌들과 석탄 생산량, 연료 소비량, 가축 두수와 같은 활동 자료를 등을 참조하여 대기 중 메탄 농도 변화에 영향을 미친 요인을 추정하였다. 그러나 보다 구체적인 요인 분석을 위해서는 향후 최신의 고해상도 지역별, 월별 메탄 배출 인벤토

리가 구축될 필요가 있다. 현재 중국의 온실가스 배출 통계는 연간 국가 총합으로 산정되고 있으며, 여러 선행 연구 또한 권역별 연간 메탄 배출량을 추산하는 데에 그치고 있다 (Huang et al., 2019; Peng et al., 2016; Gong and Shi, 2021). 우리나라 역시 온실가스종합정보센터에서 매년 국가 온실가스 인벤토리 보고서를 발간하여 연간 지역별 배출량을 공표하나 월별 배출량은 산정하지 않는다. 메탄은 계절별로 배출 또는 흡수 양상이 다르게 나타나므로 이를 반영하는 고해상도 배출량 산정이 필요하다. 향후 지역별, 월별 메탄 인벤토리가 구축된다면 특정 시기, 특정 지역의 배출량 변화를 추적하여 대기 중 메탄 농도 분석하는 데에 유용하게 활용할 수 있을 것이라 기대된다.

본 연구는 한정된 지점의 메탄 지상 관측 자료를 대기 모형과 함께 활용하여 동아시아 지역에서 인위적 배출량의 급격한 감소가 대기 중 메탄 농도에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 본 연구의 결과는 인위적 배출량이 급감한 시기에 대기 중 메탄 농도가 낮아짐을 관측 자료를 통해 확인했다는 의의가 있다. 따라서 각 국가나 지자체 등에서 적절한 배출량 감축 정책을 수립하고 이를 이행할 경우 대기 중 메탄 농도 상승을 억제하고 기후변화를 완화할 수 있을 것으로 기대된다. 나아가 인위적 활동이 대기 중 메탄에 미치는 영향을 더욱 구체적으로 이해하고 모니터링하기 위해서 향후 광범위하고 장기적인 지상 관측이 중요함을 시사한다.

참 고 문 헌

김진영, 김도용, 오재호, 김성훈, 김현구, 강용혁, 김재진, 조천호. (2015). WRF 모델을 이용한 지표항력모수화 적용과 공간해상도에 따른 한반도 풍속모의 민감도 평가. 한국풍공학회지, 19(3), 77-83.

안재호. (2015). WRF 기상모델을 이용한 수평격자 해상도에 따른 기상요소들의 예측 정확성 분석. 한국환경기술학회지, 16(4), 296-307.

Anderson, D. C., Duncan, B. N., Fiore, A. M., Baublitz, C. B., Follette-Cook, M. B., Nicely, J. M., & Wolfe, G. M. (2021). Spatial and temporal variability in the hydroxyl (OH) radical: understanding the role of large-scale climate features and their influence on OH through its dynamical and photochemical drivers. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(8), 6481-6508.

Aulakh, M. S., Wassmann, R., & Rennenberg, H. (2001). Methane emissions from rice fields—quantification, mechanisms, role of management, and mitigation options.

BP. (2022). *bp Statistical Review of World Energy 2021*

Cattaneo, C., Manera, M., & Scarpa, E. (2011). Industrial coal demand in China: A provincial analysis. *Resource and Energy Economics*, 33(1), 12-35.

Crill, P. M. (1991). Seasonal patterns of methane uptake and carbon dioxide release by a temperate woodland soil. *Global biogeochemical cycles*, 5(4), 319–334.

Curry, C. L. (2007). Modeling the soil consumption of atmospheric methane at the global scale. *Global Biogeochemical Cycles*, 21(4).

Duan, X., Wang, X., Mu, Y., & Ouyang, Z. (2005). Seasonal and diurnal variations in methane emissions from Wuliangsu Lake in arid regions of China. *Atmospheric Environment*, 39(25), 4479–4487.

Ebisuzaki W 1997 A method to estimate the statistical significance of a correlation when the data are serially correlated *J. Clim.* 10 2147 - 53

FAOSTAT (2023) Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAOSTAT (Database). Available at: <https://www.fao.org/faostat/en/#data> (accessed 16 Jan 2023).

Gong, S., & Shi, Y. (2021). Evaluation of comprehensive monthly-gridded methane emissions from natural and anthropogenic sources in China. *Science of The Total Environment*, 784, 147116. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147116>

Huang, M. T., Wang, T. J., Zhao, X. F., Xie, X. D., & Wang, D. Y. (2019). Estimation of atmospheric methane emissions and its spatial distribution in China during 2015. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 39(5), 1371–1380.

IEA. (2020) Global Energy Review 2020. The impacts of the Covid-19 crisis on global energy demand and CO2 emissions. IEA, Paris

IPCC. (2006). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.

Kenea, S. T., Lee, H., Joo, S., Li, S., Labzovskii, L. D., Chung, C. Y., & Kim, Y. H. (2021). Interannual Variability of Atmospheric CH₄ and Its Driver Over South Korea Captured by Integrated Data in 2019. *Remote Sensing*, 13(12), 2266.

Khalil, M. A. K., Rasmussen, R. A., Wang, M. X., & Ren, L. (1991). Methane emissions from rice fields in China. *Environmental science & technology*, 25(5), 979–981.

Kirschke, S., Bousquet, P., Ciais, P., Saunoy, M., Canadell, J. G., Dlugokencky, E. J., ... & Zeng, G. (2013). Three decades of global methane sources and sinks. *Nature geoscience*, 6(10), 813–823.

Le Quéré, C., Jackson, R. B., Jones, M. W., Smith, A. J., Abernethy, S., Andrew, R. M., ... & Peters, G. P. (2020). Temporary reduction in daily global CO₂ emissions during the COVID-19 forced confinement. *Nature climate change*, 10(7), 647–653.

Lee, H., Seo, W. I., Li, S., Lee, S., Kenea, S., & Joo, S. (2022). Measurement Report: Atmospheric CH₄ at regional stations of the Korea Meteorological Administration/Global Atmosphere Watch Programme: measurement, characteristics and long-term changes of its drivers. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 1-27.

Liang, M., Zhang, Y., Ma, Q., Yu, D., Chen, X., & Cohen, J. B. (2023). Dramatic decline of observed atmospheric CO₂ and CH₄ during the COVID-19 lockdown over the Yangtze River Delta of China. *Journal of Environmental Sciences*, 124, 712-722.

Lin, J. C., Gerbig, C., Wofsy, S. C., Andrews, A. E., Daube, B. C., Davis, K. J., & Grainger, C. A. (2003). A near field tool for simulating the upstream influence of atmospheric observations: The Stochastic Time Inverted Lagrangian Transport (STILT) model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D16).

Liu, Z., Ciais, P., Deng, Z. et al. Near-real-time monitoring of global CO₂ emissions reveals the effects of the COVID-19 pandemic. *Nat Commun* 11, 5172 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18922-7>

Lyon, D. R., Hmiel, B., Gautam, R., Omara, M., Roberts, K. A., Barkley, Z. R., Davis, K. J., Miles, N. L., Monteiro, V. C., Richardson, S. J., Conley, S., Smith, M. L., Jacob, D. J., Shen, L., Varon, D. J., Deng, A., S. Peng, S. Piao, P. Bousquet, P. Ciais, B. Li, X. Lin, S. Tao, Z. Wang, Y. Zhang, F. Zhou, Inventory of anthropogenic methane emissions in mainland China from 1980 to 2010, *Atmos. Chem. Phys.*, 16 (2016), pp. 14545-14562

McKnight, P. E., & Najab, J. (2010). Mann Whitney U Test. The Corsini encyclopedia of psychology, 1-1.

Monteiro, V., Miles, N. L., Richardson, S. J., Turnbull, J., Karion, A., Kim, J., ... & Davis, K. J. (2022). The impact of the COVID-19 lockdown on greenhouse gases: a multi-city analysis of in situ atmospheric observations. *Environmental Research Communications*, 4(4), 041004

National Aeronautics and Space Administration. Airborne nitrogen dioxide plummets over China. NASA: Earth Observatory 1 - 5 (2020). www.earthobservatory.nasa.gov/images/146362/airborne-nitrogen-dioxide-plummets-over-china. Accessed 02 Dec 2022.

National Development and Reform Commission. The People's Republic of China Second Biennial Update Report on Climate Change; National Development and Reform Commission: Beijing, China, 2018.

Rudelis, X., Sharma, N., Story, K. T., Brandt, A. R., Kang, M., Kort, E. A., Marchese, A. J., and Hamburg, S. P.: Concurrent variation in oil and gas methane emissions and oil price during the COVID-19 pandemic, *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 6605 - 6626, , 2021.

Saunio, M., Stavert, A. R., Poulter, B., Bousquet, P., Canadell, J. G., Jackson, R. B., ... & Zhuang, Q. (2020). The global methane budget 2000 - 2017. *Earth system science data*, 12(3), 1561-1623.

Sim, S., Lee, H., Oh, E., Kim, S., Ciais, P., Piao, S., ... & Jeong, S. (2022). Short-term reduction of regional enhancement of atmospheric CO₂ in China during the first COVID-19 pandemic period. *Environmental Research Letters*, 17(2), 024036.

Skamarock, W. C., & Klemp, J. B. (2008). A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications. *Journal of computational physics*, 227(7), 3465–3485.

Solbakken, K., Birkelund, Y., & Samuelsen, E. M. (2021). Evaluation of surface wind using WRF in complex terrain: Atmospheric input data and grid spacing. *Environmental Modelling & Software*, 145, 105182.

Staff, R. (2020) China's 2019 pork output plunges to 16-year low as disease culls herd. <https://www.reuters.com/article/us-china-economy-output-pork-idUSKBN1ZG08H>. last access: 16 Jan 2023

Statista 2021 Gross domestic product (GDP) of China in 2020 by region. <https://www.statista.com/statistics/278557/gdp-of-china-by-region/>. last access: 30 Nov 2022

Stavert, A. R., Saunio, M., Canadell, J. G., Poulter, B., Jackson, R. B., Regnier, P., ... & Zhuang, Q. (2022). Regional trends and drivers of the global methane budget. *Global change biology*, 28(1), 182–200.

Thoning, K. W., Tans, P. P., & Komhyr, W. D. (1989). Atmospheric carbon dioxide at Mauna Loa Observatory: 2. Analysis of the NOAA GMCC data, 1974 - 1985. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 94(D6), 8549-8565.

Tohjima, Y., Patra, P. K., Niwa, Y., Mukai, H., Sasakawa, M., & Machida, T. (2020). Detection of fossil-fuel CO₂ plummet in China due to COVID-19 by observation at Hateruma. *Scientific Reports*, 10(1), 1-9.

Tsuboi, K., H. Matsueda, Y. Sawa, Y. Niwa, M. Nakamura, D. Kuboike, K. Saito, H. Ohmori, S. Iwatsubo, H. Nishi, Y. Hanamiya, K. Tsuji, and Y. Baba (2013), Evaluation of a new JMA aircraft flask sampling system and laboratory trace gas analysis system, *Atmos. Meas. Tech.*, 6, 1257 - 1270, doi:10.5194/amt-6-1257-2013.

Wang W, Ciais P, Nemani R R, Canadell J G, Piao S, Sitch S, White M A, Hashimoto H, Milesi C and Myneni R B 2013 Variations in atmospheric CO₂ growth rates coupled with tropical temperature *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 110 15163

Wu, J., Gamber, M., & Sun, W. (2020). Does Wuhan need to be in lockdown during the Chinese Lunar New Year?. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(3), 1002.

Yun J et al 2020 Enhanced regional terrestrial carbon uptake over Korea revealed by atmospheric CO₂ measurements from 1999 to 2017 *Glob. Change Biol.* 26 3368 - 83

Zhao, Y., Saunio, M., Bousquet, P., Lin, X., Berchet, A., Hegglin, M. I., ... & Zheng, B. (2019). Inter-model comparison of global hydroxyl radical (OH) distributions and their impact on atmospheric methane over the 2000 - 2016 period. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(21), 13701-13723.

Abstract

Analysis of changes in methane concentration in China due to COVID-19 lockdown policy

Kim, Ye in

Department of Environmental Planning

Environmental Management Major

The Graduate School of Environmental Study

Seoul National University

Strong lockdown policies implemented worldwide in 2020 to prevent the COVID-19 pandemic have temporarily reduced anthropogenic by limiting various socioeconomic activities. In this study, in order to understand the effect of the reduction of anthropogenic emission on atmospheric methane concentration, the change in methane enhancement observed in Anmyeondo Station before and after the COVID-19 lockdown period in China was analyzed. The methane enhancement was calculated by subtracting the methane concentration observed in Minamitorishima Station, a clean atmosphere, from the methane concentration in Anmyeondo Station affected by Chinese and

Korean emission sources. In addition, the area where the methane enhancement for each hour mainly originated was judged through WRF-STILT footprint analysis, and whether there was a difference in the increase in methane before and after the COVID-19 blockade by region was analyzed.

As a result of the study, the increase in methane in China, where social containment was implemented from February to March 2020, showed a significant decrease compared to the previous year when there were no containment measures. In particular, there was a significant decrease in methane enhancement from eastern China, which was greatly affected by the lockdown. On the other hand, the methane enhancement in Korea, where social distancing has not yet been implemented in earnest, has not changed significantly compared to the average year.

This study confirmed that the decrease in artificial emissions had an immediate effect on the concentration of methane in the atmosphere using in-situ observation data. In addition, it is possible to analyze a wide range of regions ranging from Korea to China using observation data from one station. This result suggests the importance of continuous ground observation.

**keywords : Methane, Anmyeondo, Ground Observation,
COVID-19, Emissions**

Student Number : 2021-21055