

## 석탄 연료변경에 의한 몽골 게르 내 미세먼지와 일산화탄소 농도 변화

송승환<sup>1</sup>, Altangerel Bataa<sup>1</sup>, 김동현<sup>1</sup>, 김문희<sup>1</sup>, 김민정<sup>1</sup>, 이나현<sup>1</sup>, 이미래<sup>1</sup>, 전슬기<sup>1</sup>, 채희연<sup>1</sup>, 정현희<sup>1</sup>, Delgerzul Lodoisamba<sup>2</sup>, Davaalkham Dambardarjaa<sup>2</sup>, 이기영<sup>1,3,\*</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 보건대학원 환경보건학과

<sup>2</sup>School of Public Health, Mongolian National University of Medical Sciences, Ulaanbaatar, Mongolia

<sup>3</sup>서울대학교 보건환경연구소

### Changes in Concentrations of PM<sub>2.5</sub> and CO in Gers by Fuel Change in Ulaanbaatar, Mongolia

Seungwhan Song<sup>1</sup>, Altangerel Bataa<sup>1</sup>, Donghyeon Kim<sup>1</sup>, Munhee Kim<sup>1</sup>, Minjung Kim<sup>1</sup>, Nahyun Lee<sup>1</sup>, Mirae Lee<sup>1</sup>, Seulki Jeon<sup>1</sup>, Heeyeon Chae<sup>1</sup>, Hyunhee Jeong<sup>1</sup>, Delgerzul Lodoisamba<sup>2</sup>, Davaalkham Dambardarjaa<sup>2</sup>, Kiyoung Lee<sup>1,3,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental Health Sciences, Graduate School of Public Health, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea

<sup>2</sup>Department of Environmental Health, School of Public Health, Mongolian National University of Medical Sciences, Ulaanbaatar, Mongolia

<sup>3</sup>Institute of Health and Environment, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea

#### Abstract

**Objectives:** In the ger district of Ulaanbaatar, raw coal was used as fuel for heating and cooking. In May 2019, the Mongolian government replaced raw coal with processed coal to improve air quality. The aim of this study was to determine difference of PM<sub>2.5</sub> and CO concentrations in gers using raw coal and processed coal.

**Methods:** In 48 gers, PM<sub>2.5</sub> and CO concentrations was measured during daytime using a real-time monitor. Behavioral factors were observed during the measurement. Surveys were conducted on residents' indoor air quality satisfaction and coal replacement time. The measured PM<sub>2.5</sub> concentrations was compared with the PM<sub>2.5</sub> concentrations using raw coal in the past. Multiple regression analysis was conducted to identify the factors expected to affect PM<sub>2.5</sub> when replaced with processed coal. Situational factors identified in cases of CO concentrations higher than 10 ppm were determined.

**Results:** The average concentrations of PM<sub>2.5</sub> and CO in gers with processed coal were 41.2±25.7 µg/m<sup>3</sup> and 2.0±1.3 ppm, respectively. The indoor PM<sub>2.5</sub> concentrations with processed coal was significantly lower than the level with raw coal. The important factors affecting indoor PM<sub>2.5</sub> concentrations were using candle, smoking, adding fuel, cooking, and ventilation. The CO concentrations was generally low. High peak CO concentrations were observed with the stove opening and cooking using gas.

**Conclusion:** Indoor PM<sub>2.5</sub> concentrations in ger was significantly reduced by use of processed coal. Factors affecting indoor PM<sub>2.5</sub> concentrations such as using candle, smoking, adding fuel were similar to those identified in gers with raw coal. The CO concentrations in gers was low level without human health effects, however inappropriate operation could cause high CO level and adverse health effects.

**Keywords:** Coal change, Ger, Indoor air, PM<sub>2.5</sub>, CO

\* Corresponding author: Kiyoung Lee(cleanair@snu.ac.kr, 02-880-2735)

Department of Environmental Health Sciences, Graduate School of Public Health, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Republic of Korea

## Introduction

전세계인구의 50%가 난방 및 조리 용도로 석탄, 목재, 바이오매스와 같은 고체 연료를 지속적으로 사용하고 있다 [1]. 고체 연료의 사용은 개발도상국가에서 주거 생활을 위해 필수적이며 [2], 가장 많이 사용되는 연료 중 하나가 석탄이다. 석탄은 다른 고체연료에 비해 연소시간이 길어 오랜 시간 난방이 유지된다는 장점이 있다 [3]. 개발도상국가 중 하나인 몽골의 수도, 울란바토르 지역의 가구 조사결과에 따르면 울란바토르 전체 인구의 50% 이상이 거주하는 도시 외곽 게르촌에서는 난방 및 조리를 위하여 전통주택인 게르에서 지속적으로 석탄을 사용하였다 [4].

석탄은 연소 과정에서 미세먼지(Particulate matter with a diameter of 2.5  $\mu\text{m}$  or less,  $\text{PM}_{2.5}$ )의 발생원이다. 게르 내 실내 공기질을 조사한 연구에 따르면 원탄(Raw coal)을 사용했을 때 60가구의  $\text{PM}_{2.5}$  평균 농도는  $236.1 \pm 112.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며,  $\text{PM}_{2.5}$  30분 평균 농도는 최대  $797.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 나타났다 [5]. 울란바토르 시 외기 농도는 연 평균  $136 \pm 114 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며 겨울철에는 일 평균 최대  $750 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 확인되었다 [6]. 이러한 실내, 실외  $\text{PM}_{2.5}$  농도는 세계보건기구 (World Health Organization, WHO)에서 제시하는 대기환경 기준인 연평균  $\text{PM}_{2.5}$  농도  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 24시간 평균  $\text{PM}_{2.5}$  농도  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 모두 초과하는 수준이다 [7]. 게르 내  $\text{PM}_{2.5}$  농도에 영향을 미치는 요인을 확인한 연구에서 원탄을 스토브에 추가할 때  $\text{PM}_{2.5}$  농도가  $56.26 \mu\text{g}/\text{m}^3$  증가하였으며, 이외에도 실내 흡연, 외기농도 등이 게르 내  $\text{PM}_{2.5}$  농도에 영향을 주는 요인으로 확인되었다 [8, 9].

$\text{PM}_{2.5}$ 와 함께 석탄, 바이오매스 같은 고형 연료 사용 시 일산화탄소(Carbon monoxide, CO)도 건강에 악영향을 미치는 수준으로 발생할 수 있다 [10]. 인도 캘커타에서 스토브에 석탄연료를 주입하여 조리 시의 실내 CO 농도를 측정된 연구에서는 환기가 이루어지지 않을 때 1시간 평균 CO 농도가 최대  $18.1 \text{ ppm}$ 까지 확인되었다 [11]. CO에 매일 장시간 저농도로 노출될 경우 저산소증으로 인해 두통, 어지러움 등을 유발할 수 있다 [12, 13]. WHO에서는 실내 공기질과 관련하여 CO 농도를 24시간 평균  $7 \text{ ppm}$ , 8시간 평균  $10 \text{ ppm}$ 으로 제시하고 있다 [14].

몽골 정부는 국민의 46%가 거주하고 있는 울란바토르 시의 대기질 개선을 위해 2019년 5월부터 이전까지 주거 생활을 위해 사용되어온 원탄 사용을 금지하였다 [3]. 또한, 세척 및 가공 처리가 된 개량 석탄(Processed coal)을 사용하게 함으로써 대기질 개선을 위한 노력을 하고 있다. 개량 석탄은 이전 원탄과 동일한 용도로 게르 및 일반 주택에서 난방 및 조리를 위해 사용되고 있다. 그러나 아직까지 개량 석탄 사용 이후 몽골 울란바토르 대기질 또는 실내 공기질에 대한 연구는 부족하다.

본 연구의 목적은 개량 석탄을 사용하였을 때 게르 실내  $\text{PM}_{2.5}$ 와 CO 농도를 확인하고, 이를 원탄을 사용했을 때와 비교하여 석탄 종류에 따른 연소로 인해 실내에서 측정된  $\text{PM}_{2.5}$  농도에 차이가 있는지 확인하는 것이다. 또한, 게르에서 개량 석탄 연소 시 실내  $\text{PM}_{2.5}$  농도에 영향을 미칠 것으로 예상되는 행동요인들을 파악하고 각 요인이 어느 정도 수준으로  $\text{PM}_{2.5}$ 에 영향을 미치는지 확인하는 것이다.

## Methods

### 1. 연구대상

2020년 1월 7, 8, 10, 11일 4일간 울란바토르 시 게르촌 내 게르를 방문하여 실내 공기질 측정, 거주민 행동관찰 및 설문조사를 진행하였다. 연구조는 한 조당 한국인 연구원 1명, 현지인 연구원 1명으로 이루어졌으며, 총 12개 조가 구성되었다. 각 조당 하루에 1가구씩 방문하여 관찰 기간동안 48가구를 대상으로 측정 및 관찰하였다. 거주환경 관찰에 있어 몽골국립의과대학교 (Mongolian National University of Medical Science) 윤리심의위원회의 연구윤리 승인을 받은 후, 모든 게르 거주민에게 사전 동의를 구하고 연구를 진행하였다.

### 2. 자료 수집

게르 거주민을 대상으로 실내 공기질과 관련된 개인 행동요인 설문조사와 공기질 만족도 조사를 진행하였다. 또한, 게르 내 실내 공기질에 영향을 줄 것으로 예상되는 연료주입, 환기, 실내 흡연, 청소, 양초 사용, 조리 여부 등의 행동

요인을 분 단위로 관찰하고, 각 게르만의 고유 특성을 확인하였다.

자료 수집은 09시부터 18시 사이에 최소 5시간에서 최대 8시간동안 이루어졌다. 게르 내 PM<sub>2.5</sub>, 온도, 습도는 실시간 측정기기인 ASLUNG (Rododo Science, Taiwan)을 사용하여 15초 간격으로 측정 시작시간부터 종료시간까지 측정하였다. ASLUNG의 설치 위치는 중앙에 위치한 스토브를 기준으로 출입문 반대 방향 벽으로부터 1 m 떨어진 곳, 지면으로부터 0.5 m 이상인 곳으로 하였다. EL-USB-CO300 (Lascar Electronics, UK)을 사용하여 관찰기간 동안 게르 내 CO를 측정하였다. 측정기기 상단부에 위치한 센서가 전기화학적원리를 통해 CO를 30초 간격으로 측정하였다. EL-USB-CO300는 ASLUNG 옆에 설치하여 CO와 PM<sub>2.5</sub>가 동일한 위치에서 측정되게 하였다. 본 연구목적을 달성하기 위하여 2016, 2018, 2019년도 선행연구에서 울란바토르 시 게르에서 측정한 PM<sub>2.5</sub> 농도 원자료를 과거 원탄을 사용했을 때의 게르 내 PM<sub>2.5</sub> 자료로써 활용하였다 [8, 9, 15]. 선행연구에서는 ASLUNG과 또 다른 PM<sub>2.5</sub> 실시간 측정기기인 Dyllos DC1700 (Dyllos Corporation, USA)으로 PM<sub>2.5</sub>를 측정하였다. 측정 시, ASLUNG의 측정간격은 본 연구와 동일한 15초 간격이었으며 Dyllos DC1700는 1분 간격으로 측정하였다. 또한, 몽골 내 미국 대사관의 홈페이지 공개자료를 활용하여 울란바토르시의 외기 PM<sub>2.5</sub> 농도를 확인하였다 [16].

### 3. 자료 처리

ASLUNG으로 측정한 PM<sub>2.5</sub> 질량농도는 선행연구에서 여과지중량법을 통해 질량농도와와의 상관성 실험으로 산출된 보정계수를 활용하여 질량 농도( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )로 환산하였다 [17]. Dyllos DC1700로 측정한 PM<sub>2.5</sub> 수농도는 선행 연구의 보정계수를 통해 질량농도로 환산하였다 [8]. EL-USB-CO300으로 측정한 게르 내 CO 농도의 경우, 검출한계(0.25 ppm) 미만 값은 검출한계의 1/2인 0.125 ppm을 적용하였다. 이후 본 연구에서 측정된 온도, 상대습도, PM<sub>2.5</sub>, CO 자료와 선행연구의 PM<sub>2.5</sub> 원자료를 1분 평균으로 환산하여 자료 분석하였다.

미국 대사관의 공개 자료인 울란바토르시 PM<sub>2.5</sub> 자료는 1시간 간격으로 측정된 PM<sub>2.5</sub> 질량

농도였다. 따라서 본 연구와 선행연구의 각 측정일 09시부터 18시 사이의 시간대별 측정자료를 전체 평균으로 환산하여 본 연구에서 활용하였다.

원탄 및 개량 석탄을 사용할 때 확인된 실내 PM<sub>2.5</sub> 평균 농도의 비교를 Student's t-test로 분석하였다. 다중선형회귀분석을 통해 게르에서 개량 석탄 연소 시 PM<sub>2.5</sub> 농도에 영향을 주는 요인과 그 수준을 확인하였다. 통계분석은 SPSS Statistics 25 (IBM, USA) 프로그램을 이용해 진행하였다. 게르 내에서 측정된 CO 농도는 WHO 실내 공기질 가이드라인 8시간 기준인 10 ppm 초과여부를 비교하여 1분 평균 농도 중 10 ppm 이상의 상대적 고농도에서의 발생요인을 살펴보았다 [14].

## Results

### 1. 게르 실내 공기질 특성

관찰기간 동안 48가구 게르에 방문하였으나, 두 가구에서 측정기기 오류로 인한 결측이 발생하였다. 해당 게르들의 자료를 제외하고 방문한 게르(n=46)의 고유특성 정보를 Table 1에 나타냈다. 게르들의 평균 실내면적은  $23.9 \pm 4.9 \text{ m}^2$  이었다. 26가구에는 출입문 앞 별도 실내공간이 있었다. 출입문 앞 별도 실내공간은 게르 외부에 있는 물리적으로 분리된 공간으로 석탄과 주방 조리 기구 등 주거생활 관련 물품을 보관하는 용도로 사용된다. 구형 스토브를 사용하는 게르는 20가구, 개량 스토브를 사용하는 게르는 26가구였으며 모든 게르에서 주된 연료로 개량 석탄을 사용하였다. 개량 석탄으로 교체한 시기는 모든 게르에서 5월 이후라고 응답하였다. 전체 게르의 평균 온도는  $26.2 \pm 3.2^\circ\text{C}$ , 평균 상대습도는  $29.0 \pm 7.7\%$  이었다. 게르의 실내 PM<sub>2.5</sub> 농도는  $41.2 \pm 25.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이였으며, 실내 CO 농도는  $2.0 \pm 1.3 \text{ ppm}$ 이었다.

### 2. 원탄과 개량 석탄 연소 시 실내 PM<sub>2.5</sub> 농도 비교

이번 연구에서 개량 석탄을 사용했을 때의 게르(n=46) 실내 PM<sub>2.5</sub> 평균 농도는  $41.2 \pm 25.7 \mu\text{g}$

석탄 연료변경에 의한 몽골 게르 내 미세먼지와 일산화탄소 농도 변화

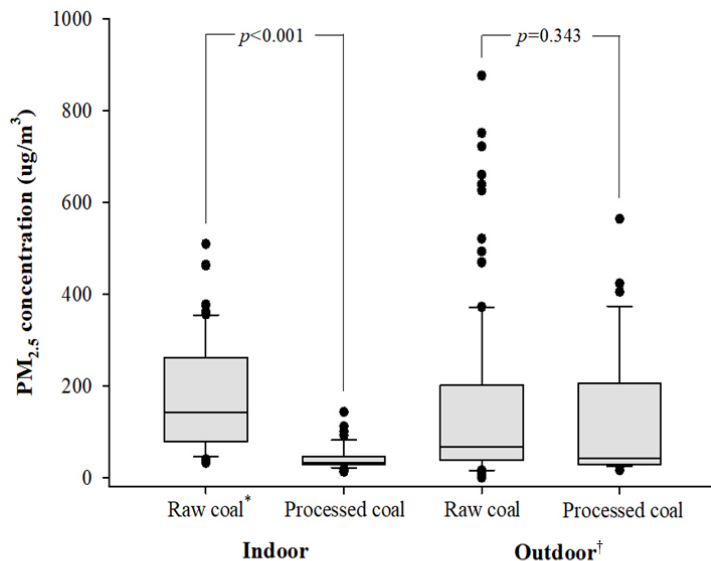
/m<sup>3</sup>이었다 (Table 1). 원탄을 사용했던 과거 2016, 2018, 2019년 당시 게르(n=92)의 실내 PM<sub>2.5</sub> 평균 농도는 171.1±113.9 μg/m<sup>3</sup> 이었다 [8, 9, 15]. 개량 석탄을 사용했을 때가 원탄을 사용했을 때 보다 실내 PM<sub>2.5</sub> 농도가 유의하게 낮았다 (Figure 1) ( $p<0.001$ ). 측정기간 동안 원탄을 사용했을 때

울란바토르시 외기 중 PM<sub>2.5</sub> 평균 농도는 149.6±181.8 μg/m<sup>3</sup>이었으며 개량 석탄을 사용했을 때는 118.8±146.7 μg/m<sup>3</sup>으로 Student's t-test 통계분석 결과 두 집단 간 PM<sub>2.5</sub> 농도는 유의한 차이가 없었다 ( $p=0.343$ , Figure 1).

**Table 1.** Characteristics of the observed gers (n=46, (%))

Characteristics		Mean values and number of gers
Area (Mean±SD, m <sup>2</sup> )		23.9±4.9
Entrance shed existence	Yes	26 (56%)
	No	20 (44%)
Stove type	Traditional	20 (44%)
	Improved	26 (56%)
Type of used coal	Raw	0 (0%)
	Processed	46 (100%)
Temperature (°C)		26.2±3.2
Relative Humidity (%)		29.0±7.7
PM <sub>2.5</sub> (μg/m <sup>3</sup> )	AM*±SD†	41.2±25.7
	GM‡(GSD)§	26.5(1.6)
CO (ppm)	AM*±SD†	2.0±1.3
	GM‡(GSD)§	1.0(2.8)

\*Arithmetic mean, †Standard deviation, ‡Geometric mean, §Geometric standard deviation



\*PM<sub>2.5</sub> Concentration measured in previous studies [8, 9, 15], †US embassy Ulaanbaatar Mongolia air quality data

**Figure 1.** Comparison of indoor and outdoor PM<sub>2.5</sub> concentrations by coal type

### 3. 게르 실내 공기질에 영향을 주는 요인

측정된 PM<sub>2.5</sub> 평균 농도는 WHO에서 제시하는 대기환경 기준 24시간 농도 25 µg/m<sup>3</sup>을 초과하였다. PM<sub>2.5</sub> 1분 농도를 종속변수로 설정하고 게르 내 PM<sub>2.5</sub> 농도에 영향을 줄 것으로 예상되는 행동요인들을 독립변수로 설정하여 다중선형 회귀분석을 실시하였다 (Table 2). 통계분석 결과, F=351.70으로 본 회귀모형은 적절하였다 (p<0.001). 양초사용, 흡연, 석탄 연료추가, 조리, 환기와 같은 각 행동요인은 PM<sub>2.5</sub> 농도에 영향을 미치고 있었다 (p<0.001). 행동요인별로 보면 게르 내 PM<sub>2.5</sub> 농도에 가장 많은 영향을 끼치는 변수는 양초 사용이었으며, 해당 행동요인이 발생할 때 PM<sub>2.5</sub> 농도는 1.25 µg/m<sup>3</sup>만큼 증가하였다. 게르에서 흡연을 할 때는 PM<sub>2.5</sub> 농도가 1.09 µg/m<sup>3</sup> 증가하였으며, 스토브에 연료를 투입할 때는 0.34 µg/m<sup>3</sup>, 조리할 때는 0.15 µg/m<sup>3</sup> 증가하

였다. 환기를 시킬 때는 PM<sub>2.5</sub> 농도가 0.13 µg/m<sup>3</sup>만큼 감소하였다.

CO 평균 농도는 2.0 ppm 수준이었다. 23회의 특정 상황에서만 WHO 실내 공기질 8시간 기준 10 ppm을 초과하는 상대적 고농도가 확인되었다. Table 3은 46개 게르에서의 전체 CO 1분 평균 농도 중 10 ppm 이상인 농도를 상대적 고농도라고 설정하여 나타낸 표이다. 총 23회의 상대적 고농도 중 스토브 개폐, 가스를 이용한 조리시에 각각 18회(79%), 2회(9%) WHO의 실내 공기질 CO 기준농도를 초과한 것을 확인하였으며, 3회(13%)는 명확한 요인을 확인할 수 없었다. 스토브 개폐는 연료 투입, 음식 조리 등을 위해 스토브의 상단 및 하단 연료주입구를 여는 행위를 모두 포함하였다. 스토브 개폐 시 최대농도는 59.8 ppm이었으며, 가스를 이용한 조리 시 최대농도는 15.2 ppm이었다. 관찰요인이 확인되지 않은 상대적 고농도의 최대농도는 15.5 ppm로 확인되었다.

**Table 2.** Multiple linear regression results on PM<sub>2.5</sub> concentrations and behavioral factors

Variables	β	SE*	95% CI† (Lower, Upper)	t value
Constant	3.22	0.01	3.21, 3.24	438.39‡
Using candle	1.25	0.03	1.18, 1.32	36.25‡
Smoking	1.09	0.08	0.93, 1.25	13.21‡
Adding fuel	0.34	0.05	0.24, 0.44	6.47‡
Cooking	0.15	0.02	0.12, 0.18	9.07‡
Ventilation	-0.13	0.02	-0.16, -0.93	-7.08‡

\*Standard error, †Confidence interval, ‡ p < 0.001

**Table 3.** Factors associated with occurrence of CO concentrations over 10 ppm (n=23\*)

Occurrence factors	Frequency	Rate (%)
Stove opening and closing	18	78
Cooking with gas	2	9
None of the observation factors	3	13
Total	23	100

\*Total number of the Ger in which carbon monoxide was measured was 46. 23 is the total number of relatively high CO concentrations of occurrence factors among the 46 Gers.

## Discussion

몽골 정부에서 대기질 개선을 위한 정책으로 가정에서 난방목적을 위해 사용하는 원탄의 전면 교체를 2019년 5월에 실시하였다 [14]. 방문한 46가구 게르에서 2019년 5월부터 11월 사이

에 석탄을 동일한 제조사의 개량 석탄으로 교체하였다. 그러나 이전 2016, 2018, 2019년도 관찰 당시에는 모든 게르에서 세척이나 가공되지 않은 원탄을 사용하였다 [8, 9, 15]. 본 연구의 개량 석탄 사용 시 실내에서 측정된 PM<sub>2.5</sub> 평균 농도는 2016, 2018, 2019년도 원탄 사용 시 게르 내에

서 측정된 PM<sub>2.5</sub> 평균 농도보다 유의하게 낮았다 ( $p < 0.001$ ). 따라서 실내에서 확인된 PM<sub>2.5</sub> 농도 차이가 석탄 교체로 인한 영향을 받았을 것이라고 추측할 수 있다. 2016, 2018, 2019, 2020년도 각 측정 일의 PM<sub>2.5</sub> 평균 외기 농도는 모두 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하였다. 이를 통해 개량 석탄 사용 시 PM<sub>2.5</sub> 평균 농도가 원탄을 사용했을 때보다 낮은 것이 외기에 의한 영향은 아닌 것으로 사료된다.

개량 석탄을 사용하였음에도 본 연구에서 확인된 전체 게르의 PM<sub>2.5</sub> 평균 농도가  $41.2 \pm 25.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  수준이었는데, 이는 WHO의 24시간 평균 PM<sub>2.5</sub> 대기환경 기준인 25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 미국 환경보호청 (United States Environmental Protection Agency, US EPA)의 24시간 대기환경기준인 35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 모두 초과하는 수준이었다 [6, 19]. 중국 베이징에서는 통제된 실험 공간에서 역청탄 (Bituminous), 무연탄 (Anthracite), 개량 석탄 (Semi-coke) 연소 시 발생하는 PM<sub>2.5</sub> 농도를 연구한 결과, 개량 석탄 연소에서의 PM<sub>2.5</sub> 농도 감소율이 평균 92±6%로 나타났다 [18]. 또한, 고체 연료별로 연소 시 측정된 PM<sub>2.5</sub> 농도를 비교한 연구에서는 개량 석탄 (Briquette)에서의 PM<sub>2.5</sub> 농도가 원탄 (Raw chunk)보다 60% 낮게 확인되었다 [20]. 개량 석탄 사용 시 실내 PM<sub>2.5</sub> 농도의 감소에도 불구하고 실제 농도는 실내환경과 건강에 영향을 줄 수 있는 수준이었다.

게르를 고유특성으로 구분하여 실내 공기질에 영향을 주는 요인을 확인한 결과, 게르 외부의 출입문 앞 별도 실내공간 유무와 게르 실내면적의 차이는 실내 PM<sub>2.5</sub>와 CO의 농도에 영향을 미치지 않았다. 출입문 앞 별도 실내공간은 게르 출입구와 연결되어 있는 구조이며 게르 실외로 나가기 위해서는 출입문 앞의 별도 실내공간을 통과해야 한다. 따라서 게르 출입문과 외부에 있는 별도 실내공간 출입문, 총 2개의 출입문을 갖는 형태이다. 이중 출입문 형태는 공기 순환을 저하시켜 실내에서 발생하는 공기 오염물질이 실외로 배출되는데 영향을 미칠 것으로 예상되었으나 실제로 차이를 보이지 않았다. 또한, 실내 면적이 작을수록 환기율이 감소할 것으로 예상하였지만 면적을 28 m<sup>2</sup> 이상과 이하로 구분하여 PM<sub>2.5</sub>와 CO 농도를 확인한 결과, 면적 크기에 따른 실내 공기질의 차이를 보이지 않았다. 이번 연구에서는 게르 실내 환기율을 직접 측정하진 않았지만 게르 외부 별도 실내공간 유

무와 게르 실내면적의 차이는 실내농도에 영향을 줄 정도로 유의하지 않은 것으로 사료된다.

본 연구에서 관찰한 행동요인 중 양초사용, 흡연에 대한 요인이 개량 석탄 연료투입보다 실내 PM<sub>2.5</sub> 농도에 더 큰 영향을 미쳤다. 양초사용과 흡연은 점화 즉시 연소되지만 개량 석탄의 경우 점화 후 바로 연소되지 않으므로 PM<sub>2.5</sub> 농도변화가 바로 나타나지 않을 것으로 보았다. 다중회귀분석을 통해 게르의 실내 PM<sub>2.5</sub> 농도에 영향을 주는 요인을 확인한 연구에서도 실내 PM<sub>2.5</sub> 농도가 흡연 시에는 2.69  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  증가하였으며, 외기 PM<sub>2.5</sub> 농도에 의해서는 0.85  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  증가하였다 [8]. 다른 연구에서는 선형 혼합 모형 회귀분석을 통해 게르 내 PM<sub>2.5</sub> 농도에 영향을 미치는 요인을 확인 결과, PM<sub>2.5</sub> 농도가 흡연 시 241.48  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 난방연료 추가 시 56.26  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 조리 시 35.76  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  증가하였으며 환기를 할 때는 58.31  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  만큼 감소하였다 [9]. 이를 통해 이전 연구에서 확인된 원탄을 사용하는 게르에서 실내 PM<sub>2.5</sub> 농도에 영향을 미치는 요인은 이번 연구의 개량 석탄 사용 시 PM<sub>2.5</sub> 농도에 영향을 미치는 요인의 종류와 유사하였다 [8, 9].

이번 연구와 이전 연구의 회귀분석에서 각 요인이 PM<sub>2.5</sub> 농도에 영향을 미치는 수준이 다르게 나타난 것은 자료의 성격과 분석방법에 의한 차이인 것으로 사료된다 [8, 9]. 본 연구에서는 1분 단위로 PM<sub>2.5</sub> 농도를 분석하였지만 이전 연구는 30분 단위로 PM<sub>2.5</sub> 농도를 분석하였다 [9]. 30분 단위로 PM<sub>2.5</sub> 농도를 분석할 경우, 측정된 PM<sub>2.5</sub> 농도를 평균으로 환산하므로 30분 동안의 누적 자료가 회귀분석 결과에 영향을 미칠 수 있다. 또한, 석탄 종류 차이에 따라 석탄 연료투입이 실내 PM<sub>2.5</sub> 농도에 영향을 미치는 수준이 다를 것으로 사료된다.

게르에서 확인된 CO 평균 농도는  $2.0 \pm 1.3 \text{ ppm}$ 으로 WHO 실내 공기질 가이드라인 8시간 기준인 10 ppm 이하였다. 하지만 각 게르의 CO 농도를 1분 평균으로 보았을 때는 15가구 게르에서 10 ppm 이상인 경우가 총 23회 확인되었다. 작성한 시간활동일지를 보았을 때 스토브 개폐 행동이 CO 고농도의 주된 요인으로 사료된다. 스토브 개폐란 스토브 상단 및 하단에 있는 연료주입구를 여는 행위로써 이러한 행위가 발생할 때 확인된 1분 평균 CO 농도는 최대 59.8 ppm이었으며, 연료투입을 위해 스토브를 개폐한 것으로 나타났다. 33.5 ppm의 CO 고농도도 확인

되었는데 당시 스토브 상단 연료투입구를 개방 후 그 위에 조리용기를 올려놓고 조리한 것으로 조사되었다. 스토브에서 발생하는 CO 농도를 측정된 일부 선행연구에서도 일정 수준 이상의 CO 농도가 확인된 바 있다. 과테말라 부엌 내 가스 스토브에서는 35.5 ppm, 과테말라 산악지대에서의 개방형 스토브에서는 9.7 ppm의 CO 농도 수준이 확인되었다 [21, 22]. 따라서 스토브를 여는 행위가 지속적으로 이루어지거나 스토브 배관 사이에서 가스 누출로 인해 실내 CO 수준이 고농도가 된다면, 이는 건강상의 영향을 초래할 가능성이 있다.

스토브 개폐요인과 가스를 이용한 조리요인 이외에도 연료 종류 및 양에 따른 CO 농도 증가의 차이를 관찰하였다. 특정 한 개 게르에서는 연료의 양에 따른 CO 농도 증가가 있었다. 해당 게르에서는 총 연료를 두 번 투입하였는데, 첫번째는 석탄만 소량 투입하였고, 두번째는 석탄과 나무를 상대적으로 많은 양을 투입하였다. 그 결과 CO농도는 각각 13.8 ppm과 59.8 ppm이었다. 본 연구에서는 연료 종류 및 양에 따른 CO 농도 증가를 평가할 정도의 자료가 구축되지 않았으나, 추후 연구가 필요할 것으로 보인다.

이번 연구에서는 게르 실내 공기질 측정 및 거주민 행동관찰을 24시간 하지 못했다는 제한점이 있다. 연구진이 주간시간에만 게르에 있었으므로 야간 시간에 실내 공기질에 영향을 줄 수 있는 행동요인 확인 및 공기질을 측정할 수 없었다. 야간시간에 거주민의 개인생활 및 취침 등을 고려하여 거주민의 불편을 최소화하기 위해 주간시간에만 연구를 진행하였으나 추후에 야간시간에도 실내 공기질을 측정 및 분석함으로써 24시간동안의 게르 실내 공기질 특성을 연구할 필요가 있다. 또한, 몽골 울란바토르 외곽에는 한 개 이상의 게르촌이 형성되어 있다. 본 연구에서는 그 중 한 개 게르촌에 있는 48가구 게르를 방문하여 개량 석탄 교체 여부 확인 및 개량 석탄 사용으로 인한 실내 공기질 연구를 진행하였다. 따라서 더 많은 게르촌의 게르를 방문하여 추가 연구를 할 필요가 있다.

## Conclusion

몽골 울란바토르의 석탄 연료변화에 따른 게

르 내부 PM<sub>2.5</sub>와 CO농도를 확인할 수 있었으며, 실내 농도에 영향을 주는 요인을 파악하였다. 개량 석탄 사용 시 실내에서 확인된 PM<sub>2.5</sub> 농도는 원탄을 사용했을 때 보다 유의하게 낮아졌지만, 장기간 노출 시 호흡기와 심혈관계 등에 영향을 줄 수 있는 높은 수준이었다. 석탄 연료이외에 양초 사용, 실내 흡연, 조리, 환기에 따라 실내농도가 영향을 받았다. 개량 석탄을 사용하는 경우 CO 실내 농도는 낮은 수준이었지만, 스토브 개폐와 같은 특정 행동 시에는 농도가 높아질 수 있다. 향후 게르 내부에서 24시간 공기질 측정과 개량 석탄 연소로 인해 발생하는 오염물질의 정성 평가에 대한 추가연구가 필요하다.

## Acknowledgement

이 연구는 보건연구재단(CMB)의 연구보조로 일부 수행되었고 서울대학교 글로벌사회공헌단과 서울대학교 보건환경연구소의 일부 지원을 받아 수행되었습니다. 측정을 함께 해준 서울대학교 보건대학원 소속 정진우, 이경준 학생과 몽골국립의과대학교 학생들에게 감사의 뜻을 전합니다. 또한, 글로벌환경보건실습이 원활하게 진행되도록 수고해 주신 박수영 조교에게도 감사를 드립니다.

## References

1. Li, L., et al. Indoor air pollution from solid fuels and hypertension: a systematic review and meta-analysis. *Environmental Pollution*. 2020;259:113914.
2. Ezzati, M. Indoor air pollution and health in developing countries. *Lancet*. 2005;366(9480):104-106.
3. Cousins, S. Air pollution in Mongolia. *World Health Organization. Bulletin of the World Health Organization*. 2019;97(2):79-80.
4. Lee, B., et al. Indoor air pollution in ger, a traditional type of residence in Mongolia (Korean). *Korean Journal of Environmental Health Sciences*. 2016;42(2):118-125.
5. Lim, M., et al. Characteristics of indoor PM<sub>2.5</sub> concentration in gers using coal stoves in Ulaanbaatar, Mongolia. *International Journal of Environmental Research and Public Health*.

- 2018;15(11):2524.
6. Guttikunda, S.K., et al. Particulate pollution in Ulaanbaatar, Mongolia. *Air Quality, Atmosphere & Health*. 2013;6(3):589-601.
  7. World Health Organization. WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide: global update 2005: summary of risk assessment (No. WHO/SDE/PHE/OEH/06.02). World Health Organization. 2006.
  8. Ahn, J., et al. Determinants of indoor PM<sub>2.5</sub> concentrations in ger, a traditional residence, in Mongolia. *Korean Journal of Public Health*. 2018;55(2):22-30.
  9. 이동수 등. 통계적 혼합모형을 이용한 몽골 울란바토르 게르 내 PM<sub>2.5</sub> 농도 증가에 영향을 미치는 주요 요인 선별. *보건학논집*. 2020;57(1):1-7.
  10. Fullerton, D.G., et al. Indoor air pollution from biomass fuel smoke is a major health concern in the developing world. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*. 2008;102(9): 843-851.
  11. Majumdar, D. and Sharma, S. Assessment of carbon monoxide exposure in roadside food-vending shanties using coal cookstoves in Kolkata, India. *Environmental Pollution*. 2019;247:431-437.
  12. Raub, J.A., et al. Carbon monoxide poisoning-a public health perspective. *Toxicology*. 2000;145(1):1-14.
  13. Townsend, C.L., and Maynard R. L. Effects on health of prolonged exposure to low concentrations of carbon monoxide. *Occupational and Environmental Medicine*. 2002;59(10):708-711.
  14. World Health Organization. WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants. World Health Organization. 2010.
  15. Ban, H., et al. Daytime profile of residential PM<sub>2.5</sub> concentrations in a ger, a traditional residence in Mongolia. *Korean Journal of Public Health*. 2017;54(1):23-30.
  16. US Embassy Ulaanbaatar Mongolia Air Quality. Ulaanbaatar-historical data. Available from: <https://www.stateair.mn/history.php>.
  17. Shin, H. Evaluation of personal exposure to particulate matter during winter in Ulaanbaatar, Mongolia. 2019. Master's dissertation. Graduate School of Public Health, Seoul National University.
  18. Li, Q., et al. Semi-coke briquettes: towards reducing emissions of primary PM<sub>2.5</sub>, particulate carbon, and carbon monoxide from household coal combustion in China. *Scientific Reports*. 2016;6(1):1-10.
  19. United States Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards Health and Environmental Impacts Division. Policy assessment for the review of the national ambient air quality standards for particulate matter. United States Environmental Protection Agency. 2020.
  20. Shen, G. Changes from traditional solid fuels to clean household energies-opportunities in emission reduction of primary PM<sub>2.5</sub> from residential cookstoves in China. *Biomass and Bioenergy*. 2016;86:28-35.
  21. Naeher, L.P., et al. Indoor and outdoor PM<sub>2.5</sub> and CO in high-and low-density Guatemalan villages. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*. 2000;10(6):544-551.
  22. Naeher, L.P., et al. Carbon monoxide as a tracer for assessing exposures to particulate matter in wood and gas cookstove households of highland Guatemala. *Environmental Science & Technology*. 2001;35(3):575-581.