

저급석탄과 폐식용유를 활용한 난방장치의 환경성 평가 - 몽골 울란바타르시 대기질 개선 측면 -

이형돈^{1*}, 윤혁진², 조성환³

¹한국산업기술시험원 환경기술본부 수소물융합기술센터
서울시 구로구 디지털로 26길 87

²플린트랩

경기도 부천시 길주로 425번길 131

³유니체스트

서울시 강남구 봉은사로 26길 14

(2022년 10월 28일 접수; 2022년 12월 15일 수정본 접수; 2022년 12월 21일 채택)

Environmental Evaluation of Heating Devices Using Low Grade Coal and Waste Cooking Oil - Aspects of Improving Air Quality in Ulaanbaatar, Mongolia -

Hyung Don Lee^{1*}, Hyouk Jin Yun², and Sung Whan Cho³

¹Korea Testing Laboratory

87, Digital-ro 26-gil, Guro-gu, Seoul, Republic of Korea

²Flint Lab

P131, Gilju-ro 425beon-gil, Bucheon-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea

³Unichest

14, Bongeunsa-ro 26-gil, Gangnam-gu, Seoul, Republic of Korea

(Received for review October 28, 2022; Revision received December 15, 2022; Accepted December 21, 2022)

요 약

몽골은 전 세계에서 대기오염문제가 매우 심각한 나라 중 하나이다. 그 원인으로는 몽골 울란바타르시 내 게르촌에서 사용되는 저급연료의 난방연소 때문이다. 본 연구에서는, 몽골 울란바타르시 게르촌에서 사용되고 있는 저급연료 및 몽골 폐식용유의 연료품질을 분석하였으며, 전통난로와 시작품 연소난방장치의 연소테스트를 통해 환경성을 평가하였다. 또한 인체위험도 분석을 통해 난방장치의 대체효과를 평가하였다. 연료특성분석 결과, 몽골석탄 중 조개탄은 회분, N, S 함량이 높은 이유로 환경성이 상대적으로 안좋은 것으로 분석되었다. 또한 3종의 석탄에 비해 폐식용유를 연소하였을 때, 대기질 개선효과가 높은 것으로 나타났다. 몽골 전통난로를 시작품난로(폐식용유 사용)로 교체할 경우, 몽골 울란바타르시의 대기환경문제를 개선할 수 있는 효과가 있을 것으로 판단된다.

주제어 : 대기오염, 난방장치, 인체노출, 몽골, 폐식용유

Abstract : Mongolia is experiencing some of the world's most serious air pollution problems. The air pollution is especially severe during the winter when raw coal and low-grade fuels are used to heat homes in Ger villages. The impact of this pollution has created significant health and socioeconomic challenges for the country. In order to mitigate this air pollution, this study analyzed the fuel quality of the low-grade fuels and Mongolian waste cooking oils used in Ulaanbaatar, Mongolia. Then the environmental characteristics of traditional stove combustion and a prototype combustion heating device were compared and analyzed. In addition, the effect of replacing the heating devices was evaluated by analyzing their risks to humans. Analysis of the fuel characteristics showed that briquettes had relatively low environmental properties as a result of their high ash, N and S content. Also, after analyzing the combustion characteristics, it was found that the air quality improvement effect was higher when waste cooking oil was burned compared to the three types of coal that were analyzed. Finally, this study evaluated the

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: kjongro@ktl.re.kr; Tel: +82-10-3808-9288; Fax: +82-2-860-1639

doi: 10.7464/ksct.2023.29.1.22 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

impact of replacing the Mongolia traditional stove with a prototype stove that uses waste cooking oil. The results of this study are expected to help to mitigate the air quality problems currently observed in Ulaanbaatar, Mongolia.

Keywords : Air pollutants, Heating devices, Human exposure, Mongolia, Waste cooking oil

1. 서론

몽골은 식수 및 위생 시설 부족, 난방 문제, 생활 폐기물 문제 등 다양한 도시 환경 및 주거 문제에 직면하고 있다. 특히 도시로의 인구 집중이 꾸준히 진행되면서 도시로 유입된 자영농과 유목민들이 몽골 전통 텐트인 “게르”를 설치하여 울란바타르시 외곽에 거주하게 되면서 시 전체 인구의 60%가 게르촌을 형성하고 있는 상황이다[Badarch et al.[1]]. 몽골의 수도인 울란바타르시는 세계에서 겨울이 가장 추운 도시로 온도가 매우 낮아 연중 9개월은 난방이 필요하며, 게르(Ger)촌의 절대 다수는 단순한 형태의 철제 난로로 난방과 취사를 해결하고 있다 [2,3]. 울란바타르시 게르촌 지역의 인구가 팽창하고 주거환경 문제와 대기환경 악화에 따른 환경문제, 실업, 범죄 등 다양한 사회 문제가 야기되고 있는 실정으로 게르촌의 전통난로에서 사용되는 저급 연료(저질 석탄, 페타이어, 쓰레기 등)로 인해 겨울철 대기오염이 심각한 수준에 이르고 있다[3-5].

또한 최근 게르촌에는 게르가 아닌 다양한 건축 자재를 사용한 주택들이 많이 건축되고 있으나 도시의 거주 인프라가 갖추어져 있지 않아 동일한 방식의 기존 전통난로에 의한 난방을 사용하며, 이와 반대로 난방이 필요한 공간은 전보다 커져 더 많은 연료를 소모해 대기오염은 더욱 악화되고 있다[4,5]. 현재 몽골에서는 다양한 방법으로 저급연료의 연소로 인한 대기오염문제를 해결하고자 노력하고 있으며, 그 대응 방안으로 Figure 1에서 보는 바와 같이 2020년부터 성형연료(조개탄)를 제조하여 게르지역에 보급을 시작하였고, 아울러 기존에 사용되었던 저급석탄을 금지하는 정책을 추진하였다[6,7]. 그러나 정부의 무분별한 조개탄 제조·공급 과정에서 포함되는 다양한 화학물질과 낮은 품질의 바인더(Binder) 등을 사용하여 제조된 조개탄으로 인해 난방기 가동에 따른 인명사고(일산화탄소 중독 사망)가 끊임없이 발생되고 있다. 이러한 상황에서 2022년부터 몽골 정부에서는 저품질의 성형연료를 대체할 수 있는 정제된 조개탄을 보급하는 동시에 환경성과 안정성이 확보된 연료보급 및 난방장치보급이 매우 필요하다고 판단하고 있다 [8,9].



Figure 1. Coal briquette in Mongolia.

이에, 본 연구에서는 몽골 울란바타르시 게르촌에서 사용하고 있는 저급연료(저급석탄, 성형탄) 및 몽골 폐식용유에 대한 연료품질과 성상을 비교분석하고 전통난로와 개발된 연소난방장치의 연소테스트를 통해 환경성을 비교 분석하고자 하였다. 또한 분석된 결과를 활용하여 난방장치의 대체효과를 대기질 개선과 인체위험도 측면에서 종합적으로 평가하였다.

2. 실험방법

2.1. 시험기간 및 장소

2019년 중순부터 2020년 초까지 몽골 울란바타르시 수구바타르구 내 게르 시험동(Figure 2)을 3곳 설치하였다. 연구진에서 개발한 난방장치와 몽골 전통난로를 각 게르시험동에 설치하고, 연료는 몽골 석탄 2종과 몽골 폐식용유 1종을 전통난로와 난방장치에 정량 투입하였으며, 대기오염물질은 5종(CO, O₂, CO₂, SO₂, NO_x)을 측정하였다.

2.2. 시험 대상장치

폐식용유 활용 연소난방장치는 1차 제품(720(h) X 280(w) X 472(d))과 활용성을 높인 2차 제품(632(h) × 304(w) × 576(d))을 대상으로 하였고, 제어시스템, 연료공급기관, 연료탱크 등으

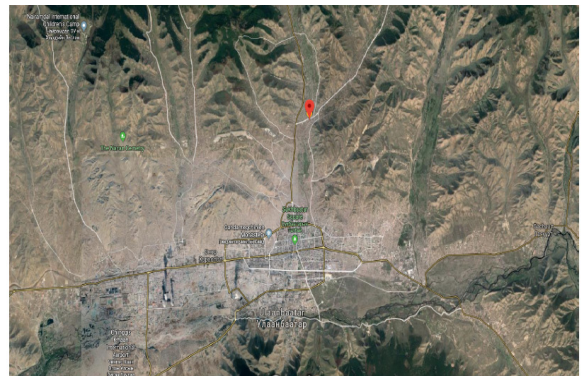


Figure 2. Test location(Ger) in Sükhbaatar District, Mongolia (47°58'36.7"N 106°55'50.0"E).

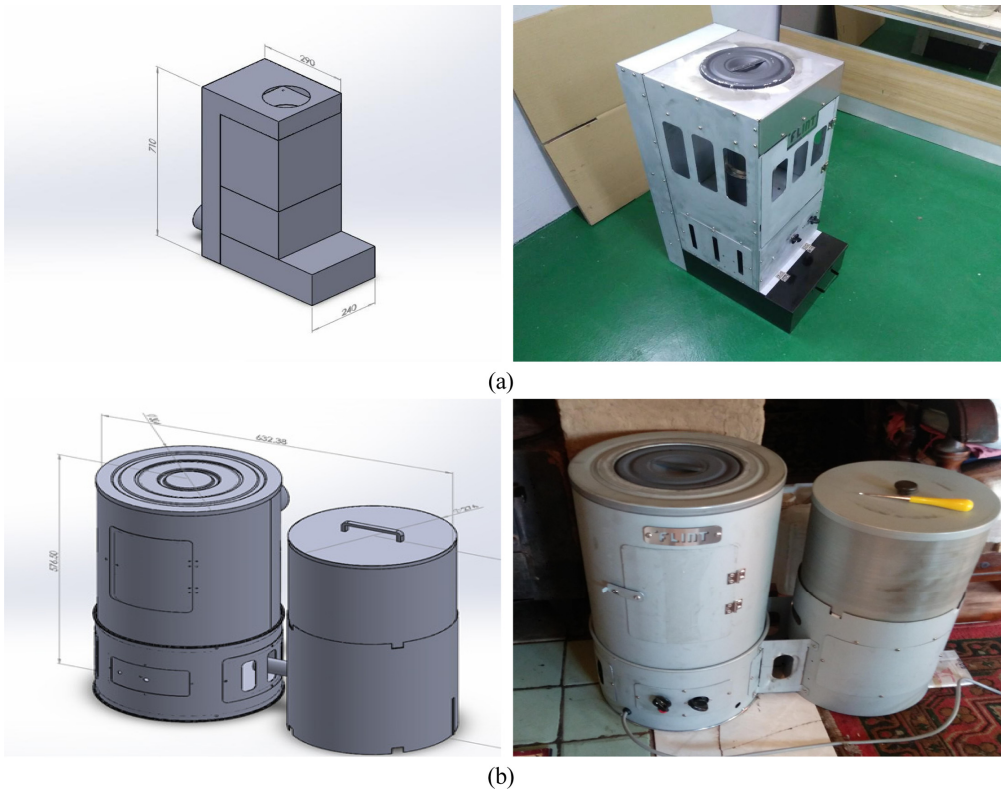


Figure 3. Prototype heating boilers (a) 1st prototype, (b) 2nd prototype.

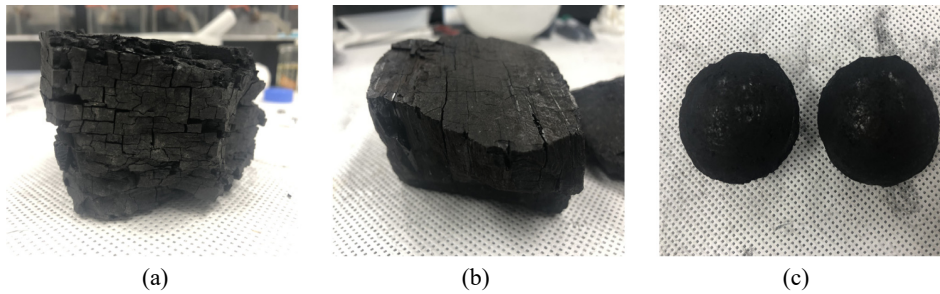


Figure 4. The coals sample from Mongolia (a) Baga nuur, (b) Nalaikh, (c)Tavan Tolgoi (Briquettes).

로 구성되어 있으며, 기본 설계 구조는 두 제품 모두 동일하다 (Figure 3). 각 제품별 특징은 1차 시제품은 고체화된 연료를 액화할 수 있는 히터기능과 저온의 환경에서 사용중 연료가 고체화 되지 않게하기 위한 1차형 구조로 설계되었다. 또한 난방 열을 이용하여 조리가 가능하도록 하고 배기열을 통한 열손실을 줄이기 위한 이중배기구 구조 타입으로 제작하였다. 2번째 시제품은 1차 제품이 히터본체와 연료탱크가 수직구조로 구성되어 일체화된 디자인으로 개발되었다면, 2차 제품은 본체와 연료탱크가 수평적 구조의 외부 설치형으로 설계하였다. 이를 통해 연료탱크에 연료를 주입하고 내부청소가 용이하도록 설계하였으며, 일부 부품을 내구성이 높은 제품으로 구성하였고 자동점화장치를 장착하여 연소 시 발생하는 소음, 안정성 및 편리성을 확보하였다. 또한 연소효율을 높이고자 흡입공기 유량을 컨트롤할 수 있도록 일부 개선하였다.

2.3. 시험방법

2.3.1 연료 성분분석

Figure 4에 나타난 몽골에서 수급한 석탄 3개 시료(유연탄 2개, 조개탄 1개) 및 몽골 폐식용유를 현지에서 공급받았고, 한국 폐식용유(Waste cooking oil, WCO) 1개 시료를 한국산업기술시험원 실험실에서 분석하였다. 몽골의 폐식용유는 수구바타르구 내 식품공장, 대형 레스토랑, 호텔 등에서 공급받은 폐식용유를 사용하였다. 공업분석은 ASTM method(D3752)와 폐기물공정시험방법에 따라 분석하였다.

화학적 원소 조성(C, H, O, N, S)은 원소분석기(NA 1500, FISON, Italy)를 이용하여 분석을 수행하였으며, 고온(1,020 °C 이상)에서 시료를 연소시켜 나온 가스 성분을 열전도검출기 (Thermal Conductivity Detector, TCD)를 통해 분석함으로써 시료의 원소조성을 구하였다. 원소분석에 사용된 기기의 운전조건은 아래 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Test condition

Contents	Spec.
Elemental Analyzer	NA 1500(FISON Ins. Italy)
Column	2 m length, diameter 6 * 4 mm
Detector	TCD(Thermal Conductivity Detector)
Carrier Gas	He Gas, 100 mL/min
Combustion Reactor Temp.	1,020 °C
Reaction Reactor Temp.	60 °C

발열량 측정은 bombe 열량계로 시료를 연소시켜 연소시키는 동안의 온도 상승을 측정하고, 시료전처리하는 1 mm 금속망 체를 통과하는 크기로 조정된 후 발열량을 측정하였다. 습기준 저위 및 고위 발열량은 발열량, 수소 중량(%), 그리고 수분 중량(%)을 통해 아래의 Equation (1)과 같이 계산하였다.

$$H_{hv} = H_d \times \left(\frac{1 - W}{100} \right) \quad L_{hv} = H_h - 600 \times \left(\frac{9H}{100} + \frac{W}{100} \right) \quad (1)$$

- H_m : 습기준 고위발열량 (kcal/kg)
- L_m : 습기준 저위발열량 (kcal/kg),
- H_d : 열량계로 측정된 발열량 (kcal/kg),
- H : 수소 중량(%), W : 수분 중량(%)

2.3.2 대기오염물질 분석

몽골 울란바타르시 현지에 설치된 전통난로 1종과 본 연구에서 개발한 폐식용유 난방장치 2종에 대하여, 몽골 게르촌 현지에서 대기오염물질을 분석하였다(Figure 5). 대기오염물질(CO, CO₂, SO₂, NO_x) 분석은 대기오염공정시험기준(2017)에 있는 자동측정법 ES 01307.3, ES 01308.3, ES 01304.3a 등에 따라 이동형 측정장비(MK 6000)를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 연료품질 비교평가

원소 분석결과(Table 2), 몽골 석탄 3종의 경우, 조개탄인 Tavan Tolgoi탄이 탄소성분이 가장 높은 것(65.05%)으로 분석되었으며, Nalaikh탄(63.88%), Baga nuur탄(63.24%) 순으로 나타났다. 대기오염물질의 발생에 가장 큰 영향을 주는 질소함량은 Tavan Tolgoi탄(1.76%)이 가장 높았으며, 황함량은 Nalaikh탄(1.33%)이 가장 높았고, Baga nuur탄(0.31%)이 가장 낮은 것으로 분석되었다. 폐식용유의 경우, 국내폐식용유에 비해 몽골산 폐식용유에 질소와 황함량이 다소 높고, 탄소함량이 다소 낮아, 상대적인 품질은 한국산 폐식용유에 비해 떨어지는 것으로 분석되었으며, 연소에 따른 대기오염물질의 성상에 영향을

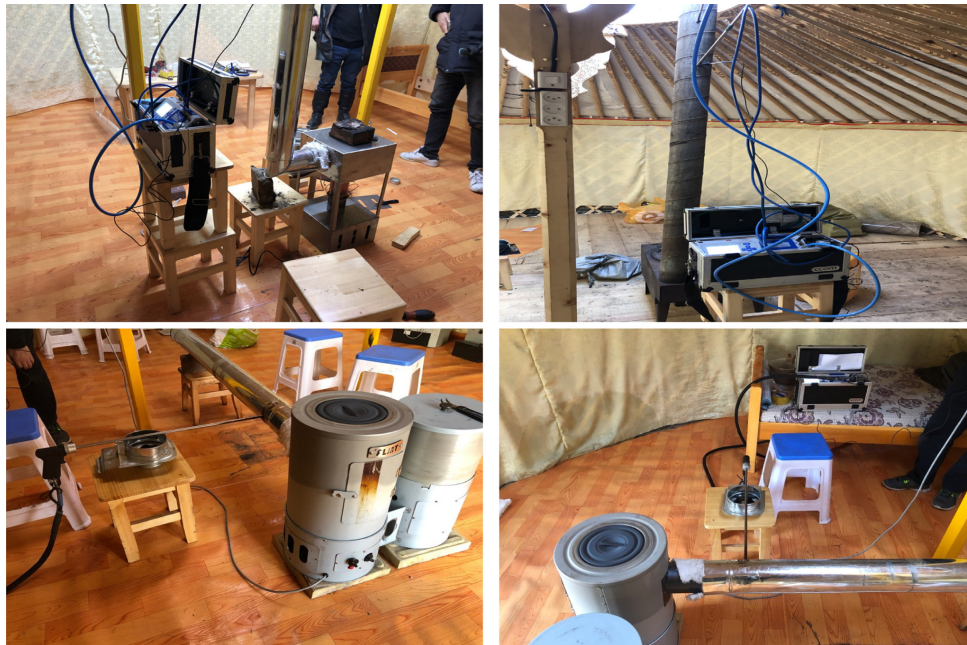


Figure 5. Measurement of air pollutants in Mongolia.

Table 2. Results of elemental analysis

No.	Sample	C	H	O	N	S	
1	Coals	Baga nuur	63.24	4.22	20.48	0.96	0.31
2		Tavan Tolgoi	65.05	3.58	5.81	1.76	1.10
3		Nalaikh	63.88	4.39	21.74	1.16	1.33
4	Korea waste cooking oil		76.86	11.37	11.36	0.18	0.03
5	Mongolia waste cooking oil		75.45	9.92	13.55	0.21	0.12

Table 3. Results of proximate analysis and calorific value

No.	Sample	M	V	A	F	Hhv	Lhv	
1	Coals	Baga nuur	20.32	33.02	6.31	40.34	5,698	5,348
2		Tavan Tolgoi	2.20	21.04	20.63	56.13	6,271	6,065
3		Nalaikh	17.53	34.21	7.20	41.06	5,755	5,413
4	Korea waste cooking oil	0.05	99.87	0.02	0.01	9,321	8,774	
5	Mongolia waste cooking oil	0.06	98.34	0.50	0	8,931	8,395	

M : Moisture, V : Volatile mater, A : Ash, F : Fixed Carbon

줄 것으로 판단된다. 삼성분 분석결과(Table 3), 수분함량은 Baga nuur탄이 20.32%로 가장 높았으며, 휘발분은 Nalaikh탄(34.21%)가 가장 높았다. 연소에 따른 최종 재의 함량을 나타내는 회분함량은 Tavan Tolgoi탄이 20.63%로 크게 높은 것으로 나타나, 다른 석탄연료에 비해 연소 후, 발생하는 폐기물처리량이 가장 높을 것으로 예측된다. 연료의 발열량을 분석한 결과, Tavan Tolgoi탄의 저위발열량 6,065 kcal/kg으로 가장 높았고, Nalaikh탄 5,413 kcal/kg, Baga nuur탄 5,348 kcal/kg순으로 나타났으며, 폐식용유의 경우 한국산이 8,774 kcal/kg, 몽골

산이 8,395 kcal/kg로 한국산 폐식용의 열량이 다소 높은 것으로 나타났다.

3.2. 대기오염물질 분석 결과

폐식용유를 연료로 사용하는 난방장치(1차 제품)와 몽골 석탄 2종(Baga nuur, Tavan Tolgoi)을 사용하는 전통 난방기에서 연소되어 배출되는 대기오염물질을 실시간 모니터링하였으며, 1차 분석결과는 아래 Figure 6-7에 나타내었다. Baga nuur 석탄 연소시 발생하는 대기오염물질 중 CO의 경우, 최대 1489.0 ppm

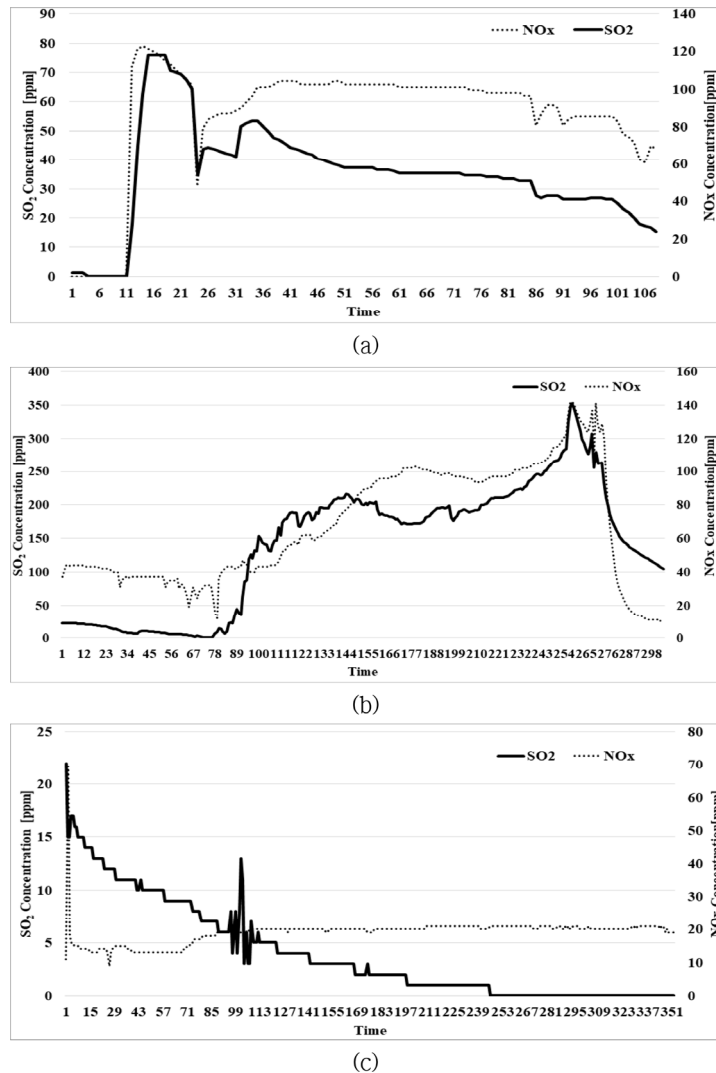


Figure 6. Results of concentration for SO₂ and NO_x (a) Baga nuur, (b) Tavan Tolgoi(Briquettes), (c) WCO.

(평균 1303.2 ppm)으로 매우 높은 농도를 보였으며, 연소에 따라 일정하게 CO농도가 점차적으로 증가되는 경향이 나타났다.

Baga nuur탄 연소에 따른 SO₂는 연소에 따라 점차적으로 감소하며, 안정적인 농도추세를 보였으나, 최대농도는 140.9 ppm(평균 60.3 ppm)으로 나타났으며, NO_x는 최대농도 79.0 ppm(평균 61.8 ppm) 수준으로 SO₂에 비해서는 다소 낮은 농도를 보였다. 조개탄인 Tavan Tolgoi탄의 경우, CO 최대농도가 9217.0 ppm(평균 4049.0 ppm)으로 매우 높은 경향을 보였고, 그 원인으로 초기 연소에 필요한 과잉공기로 인해 CO농도가 급격하게 상승했기 때문이다. 연소가 진행됨에 따라, CO농도 경향은 감소하며 안정화되었으나, 평균농도는 가장 높은 결과를 보였다.

특히, Tavan Tolgoi탄은 연소형태와 CO농도경향이 불규칙적으로 발생되었다. 이는 난방장치 특성상 연소조건에 필요한 정량적인 공기비가 확보되지 못하는 조건이고, 이에 따라 적절한 연료투입량이 일정하지 못했기 때문으로 판단된다. SO₂농도는 최대 농도가 352.0 ppm(평균 140.9 ppm)으로 Baga nuur탄에 비

해 높은 농도 수준을 보였으며, 농도가 점차적으로 증가하는 것으로 나타났다. NO_x 최대농도는 142.0 ppm(평균 67.5 ppm)으로 Baga nuur탄에 비해 다소 높은 농도를 나타내었다. 전체적으로 저급석탄과 조개탄의 연소시험 결과는 매우 불안정하였으며, 현재 이 장치를 사용하는 게르촌 주민들이 밀폐공간에서 연소할 경우, CO 중독 등 인체에 유해한 영향이 상당히 존재할 것으로 사료된다.

반면 몽골 폐식용유를 투입한 난방장치의 CO는 최대농도가 83.0 ppm(평균 64.2 ppm)으로 석탄난로에 비해 월등히 낮은 농도를 보였으며, SO₂ 최대농도는 13.0 ppm(평균 4.0 ppm), NO_x는 최대농도가 21.0 ppm(평균 18.9 ppm)으로 상대적으로 배출되는 대기오염물질 농도가 매우 낮은 것을 확인하였다.

폐식용유 난방장치(2차 제품)에 대한 대기오염물질 농도를 8회에 걸쳐 분석을 수행하였으며, 그 결과는 아래 Table 4와 같다. 분석결과, 배가스 내 O₂ 농도는 다소 감소한 것으로 나타나, 평균농도 10.9%를 보여 1차 제품에 비해 연소조건이 개선

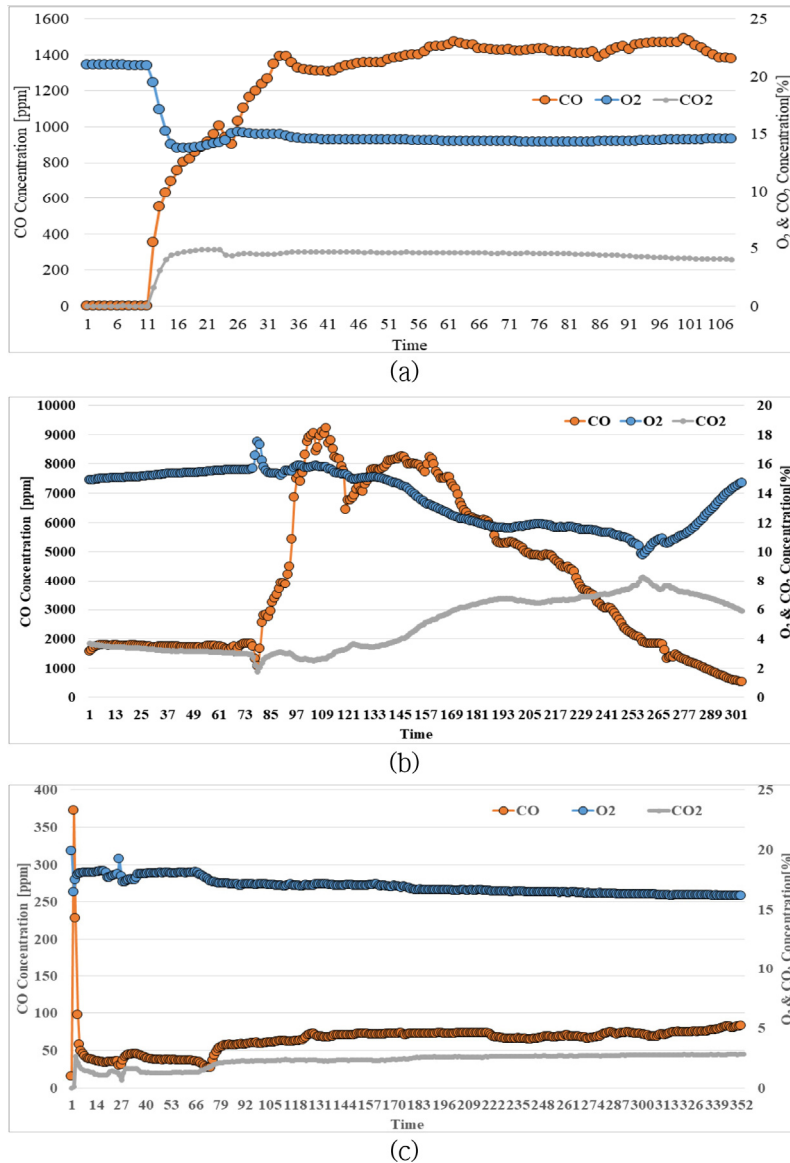


Figure 7. Results of concentration for CO, CO₂ and O₂ (a) Baga nuur, (b) Tavan Tolgoi(Briquettes), (c) WCO.

Table 4. Results of air pollutants for 2nd prototype

No.	O ₂	CO ₂	CO	NO _x
	%		ppm	
1	12.4	4.7	8.0	70.0
2	10.9	5.6	10.0	-
3	9.5	6.2	30.0	-
4	11.1	5.6	11.0	-
5	12.0	4.9	7.0	-
6	10.7	5.6	23.0	54.0
7	10.6	5.7	24.0	55.0
8	9.6	6.2	31.0	67.0
Avg.	10.9	5.6	18.0	61.5

된 것으로 평가되었다. 이는 연소점화를 자동으로 바꾸고, 일정한 공기유입이 될 수 있도록 팬유량을 연료투입 비율과 함께 조절될 수 있도록 개선한 점에 기인한 것으로 판단된다. CO농도는 일부 불완전연소가 개선됨에 따라 평균농도 18.0 ppm 수준으로 1차 제품에 비해 낮은 농도분포를 보였다. 반대로, CO₂ 농도는 다소 증가한 5.6%, NO_x농도는 평균 61.5 ppm 수준으로 분석되었다.

3.3. 인체노출지수 평가

인체노출지수법(Intake Fraction, IF)은 대기 중 존재하는 대기오염물질(입자상, 가스상)의 배출량과 수용체인 대상지역의 노출 인구집단의 인구분포와 대기오염농도, 그리고 인체가 흡입하는 양을 나타낸 호흡율을 활용하여 각 대기오염물질과 인체의 흡입 간의 관계를 나타낸 함수이다[10-12]. IF지수를 이용한 위험도 산정 연구는 대기오염을 직접적으로 유발하는 배출원으로부터 배출된 오염물질을 인체가 직접적으로 노출하면서 흡입하는 원리(Emission-To-Effects, ETE)를 적용하여 객관적이고 정확한 위험도 산정방법이라고 할 수 있다[10-13]. 특히 IF지수는 오염물질의 배출과 인체가 흡입하는 흡입량과의 관계를 수치화시킨 것으로 배출되는 소스원과 잠재적으로 노출되는 양과의 관계를 정량적으로 계산할 수 있다는 장점이 있다[11-14].

IF 추정 연구에 필요한 변수로는 아래 Equation (2)와 같이 해당 오염물질의 총 배출량유속(E: g s⁻¹), 오염물질에 노출되는 총 인구수(P), 평균 호흡 부피분율(Q: m³ s⁻¹), 오염물질의 농도(C: g m⁻³) 등을 이용해 노출위험도 지수를 계산한다. 만약 IF지수값이 1이라고 하였을 때, 이 수치는 1톤의 대기오염물질이 대기 중으로 배출되는 것으로 가정한다면, 그 지역에 사는 인체가 흡입하는 대기오염물질이 1 g 수준임을 의미하는 것으로, IF지수값이 높을수록 인체흡입량이 높은 것으로 평가되어, 보건학적 측면에서 안좋은 결과라는 것을 의미한다[10-15].

Intake Fraction(iF)=

$$\frac{\text{Population Intake}}{\text{Total Emissions}} = \frac{\int_{T_1}^{T_2} \left\{ \sum_{i=1}^P (C_i(t) \times Q_i(t)) \right\} dt}{\int_{T_1}^{T_2} E(t) dt} \quad (2)$$

Table 5. The respiratory rate

Breathing rate (m ³ day ⁻¹)	Indoor at home	In or near a vehicle	Other outdoor locations
Children	12.5	14.0	18.7
Adults	13.8	15.5	20.5
Elderly	13.1	14.8	19.5

Table 6. Characteristics of each stove used IF value

Contents	Temp.	Diameter	Flow rate	Flux
	°C	mm	m s ⁻¹	m ³ min ⁻¹
Traditional stove	200	150	7.0	16.9
Prototype stove	150		10.3	12.8

이에 본 연구에서는 본 연구에서는 2가지 타입의 난방기 사용에 따른 IF지수값을 구하기 위해 어린이, 성인, 노인으로 구분되어 있는 Table 5에 나타난 Luo et al.[16]의 연구 중, 호흡률에서 성인의 실내 호흡률 13.8 m³·person⁻¹·day⁻¹과 실외 20.5 m³·person⁻¹·day⁻¹ 값을 적용해 인체노출지수를 평가하였다.

분석조건으로 울란바타르시 인구는 약 150만명으로 추산되며, 이중 게르촌에 거주하고 있는 인구는 60%(약 90만명)로 이중, 전통 게르에 거주하고 있는 인구를 40%로 추산하여, 36만명, 일반게르 거주 인구를 60%로 하여 54만명으로 설정하였다. 노출량 시나리오는 게르촌에서 사용하고 있는 석탄난로를 비율(10, 30, 50, 75, 100%)에 따라 대체함에 따라 인체노출지수의 변화를 분석하였다. 또한 노출지수에 사용된 오염물질은 CO로 설정하였으며, 배출량 계산은 Table 6에 나타난 바와 같이 실제 측정된 난방장치별 배출가스온도, 배출가스유속, 직경을 이용해 총 유량과 배출량(g day⁻¹)을 계산하였다.

실내 호흡율을 적용해, 시나리오 5개 사례(10, 30, 50, 75, 100% 난방기 교체)에 따른 인체노출지수를 비교한 결과, 전통난로 100% 사용 시 IF지수값은 270.0로 나타났고, 10% 교체 시 263.4(전통난로: 243.0, 폐식용유난로: 20.4), 30% 교체 시, 250.2(전통난로: 189.0, 폐식용유난로: 61.2), 50% 교체 시 237.0(전통난로: 135.0, 폐식용유난로: 102.0), 75% 교체 시 220.5(전통난로: 67.5, 폐식용유 난로: 153.0), 100% 교체 시 IF지수 값은 204.0로 평가되었다. 실외 호흡율을 적용해, 시나리오 별로 분석한 결과, 전통난로 100% 사용 시 IF지수값은 401.2로 나타났고, 폐식용유 난방기 교체를 10%할 경우 391.3(전통난로: 361.0, 폐식용유난로: 30.3), 30% 교체 시, 371.7(전통난로: 280.8, 폐식용유 난로: 90.9), 50% 교체 시 352.1(전통난로: 200.6, 폐식용유난로: 151.5), 75% 교체 시 327.5(전통난로: 100.3, 폐식용유난로: 227.3), 100% 교체 시 IF지수 값은 303.0로 평가되었다.

종합적으로 분석해보면, 기존 전통난로를 폐식용유난로로 비율에 따라 교체할 경우, 노출지수 저감율은 각각 2.4%, 7.3%, 12.2%, 18.3%, 24.5% 저감될 것으로 예측되어, 몽골 대기질과 주민들의 건강영향에 긍정적인 결과를 갖고 올 수 있음이 나타났다. 단, 이번 연구를 통해 분석된 IF지수값은 전통난로를 사용하는 실제 인구수와 폐식용유 난로를 교체하여 사용하는 인구수를 가정된 수치로 입력하여 시나리오에 따른 인체

Table 7. Human exposure reduction rate by indoor breathing rate

Contents	IF value scenario					
	0%	10%	30%	50%	75%	100%
Traditional stove	270.0	243.0	189.0	135.0	67.5	0
Prototype stove	0	20.4	61.2	102.0	153.0	204.0
Total	270.0	263.4	250.2	237.0	220.5	204.0
Human exposure reduction rate (%)	-	2.4	7.3	12.2	18.3	24.5

Table 8. Human exposure reduction rate by outdoor breathing rate

Contents	IF value scenario					
	0%	10%	30%	50%	75%	100%
Traditional stove	401.2	361.0	361.0	200.6	100.3	-
Prototype stove	-	30.3	90.9	151.5	227.3	303.0
Total	401.2	391.3	371.7	352.1	327.5	303.0
Human exposure reduction rate(%)	-	2.4	7.3	12.2	18.3	24.5

노출 저감율을 계산한 결과이다. 특히 국외에서 IF지수값은 주로 이동오염원(자동차 등)에서 배출되는 대기오염물질을 활용해, 많은 측정데이터를 통계화시켜 도출하는데 활용하는 것으로 알려져 있다[13-14,16]. 따라서 본 연구에서는 몽골 현지 시험 조건과 기간이 제약이 있어 측정데이터 개수의 한계와 다양한 조건에서의 실험결과가 반영된 값이 아닌 점은 감안해야 할 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 몽골 저급석탄 3종과 폐식용유 2종에 대한 성분분석을 진행하였고, 몽골 현지 게르촌에서 연료별 난방장치 가동에 따른 대기오염물질 발생특성과 이에 따른 인체노출지수를 시나리오에 따라 평가하였으며, 다음과 같은 결론이 도출되었다.

3종의 몽골석탄과 폐식용유를 분석한 결과, 조개탄(Tavan Tolgoi)은 일반석탄에 비해 낮은 수분함량을 갖고 있으나, 회분함량이 상대적으로 높아 폐기물처리에 문제를 보일 것으로 나타났다. 발열량은 조개탄이 가장 높았으나, N과 S함량이 상대적으로 높아 대기질에 악영향이 있는 연료임을 확인하였다. 또한 게르촌에서 전통난로 가동 시 연소의 최적화된 조건을 잡지 못한 상태에서 운전할 경우, 불완전연소에 따른 위험성이 발생할 수 있을 것으로 판단된다.

난방장치 가동에 따른 연소특성을 분석한 결과, 조개탄은 다른 석탄연료에 비해 CO평균농도가 매우 높았으며, SO₂, NO_x 농도도 높은 경향을 보였다. 또한 저급석탄과 조개탄의 연소시험결과는 전체적으로 매우 불안정하였으며, 현재 이 장치를 사용하는 게르촌 주민들이 밀폐된 공간에서 난방을 할 경우, CO에 의한 유해한 영향이 클 것으로 평가되었다. 또한 미세먼지의 2차 영향물질인 NO_x농도에 대한 저감이 필요할 것으로 판단된다. 몽골 폐식용유 연소 시, CO농도는 전통연료에 비해 크

게 낮은 수준이었으며, SO₂, NO_x의 농도수준도 유사하였다. 종합적으로 기존 전통난로를 폐식용유 난방기로 대체하여 사용하였을 경우, 울란바타르 시 대기환경문제를 일부 개선할 수 있는 효과가 있을 것으로 사료된다.

인체노출지수평가 결과를 통해 폐식용유 난방장치 교체 시 몽골 울란바타르시의 대기환경문제를 일부 개선할 수 있는 효과가 있을 것으로 사료된다.

감 사

본 연구는 산업통상자원부 한국산업기술평가관리원의 산업기술혁신사업 중 디자인혁신기술개발사업에 의해 진행되었습니다.

References

1. Badarch, J., Harding, J., Dickinson-Craig, E., Azen, C., Ong, H., Hunter, S., Pannaraj, P. S., Szepesi, B., Screenendorj, T., Davaa, S., Ochir, C., Warburton, D., and Readhead, C., "Winter Air Pollution from Domestic Coal Fired Heating in Ulaanbaatar, Mongolia, Is Strongly Associated with a Major Seasonal Cyclic Decrease in Successful Fecundity," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, **18**(5), 2750-2760 (2021).
2. Barabad, M. L. M., Jung, W. S., Versoza, M. E., Kim, M. J., Ko, S. W., Park, D. S., and Lee, K. Y., "Emission Characteristics of Particulate Matter, Volatile Organic Compounds, and Trace Elements from the Combustion of Coals in Mongolia," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, **15**(8), 1706 (2018).
3. Shannon, C., Kaufmann, R. B., Edwards, R., and Smith, K. R., "Impact of Improved Stoves on Indoor Air Quality in Ulaanbaatar, Mongolia," Energy Sector Management Assistance Program(ESMAP) Report 313/05. Washington DC. (2005).
4. Baris, E., Rivera, S., Boehmova, Z., and Constant, Z., "Indoor

- Air Pollution in Cold Climates: The Cases of Mongolia and China,” Knowledge exchange series, No. 8. World Bank, Washington, DC. (Dec. 2006).
5. Soyol-Erdene, T. O., Ganbat, G., and Baldorj, B., “Urban Air Quality Studies in Mongolia: Pollution Characteristics and Future Research Needs,” *Aerosol Air Qual. Res.*, **21**(12), 210163, (2021).
 6. Jun, S. M., “Is the Raw Coal Ban a Silver Bullet to Solving Air Pollution in Mongolia?: A Study of the Mongolian Government’s Air Pollution Reduction Policies and Recommendations in the Context of COVID-19,” *J. Public Int. Aff.*, (2021).
 7. Baljmaa, T., “Ulaanbaatar stocked up on 60,000 tons coal briquette for upcoming winter,” MONTSAME, (Aug. 2020). <https://montsame.mn/en/read/235035>
 8. Bayartsogt, K., “Mongolia’s new ‘cleaner’ fuel linked to deaths, illness,” *Mail & Guardian*, (Nov. 2019). <https://phys.org/news/2019-11-mongolia-cleaner-fuel-linked-deaths.html>
 9. Erdenejargal, E., “Production of refined coal briquette to be intensified,” (July, 2022). <https://montsame.mn/en/read/301311>
 10. Bennett, D. H., McKone, T. E., Evans, J. S., Nazaroff, W. W., Margni, M. D., Jolliet, and Smith, K. R., “Peer Reviewed: Defining Intake Fraction,” *Environ. Sci. Technol.*, **36**(9), 206A-211A (2002).
 11. Lamancusa, C., Parvez, F., and Wagstrom, K., “Spatially resolved intake fraction estimates for primary and secondary particulate matter in the United States,” *Atmos. Environ.*, **150**(2), 229-237 (2017).
 12. Holnicki, K., Nahorski, Z., and Kaluszko, A., “Intake Fraction (iF) Assessment in an Urban Area,” *IFAC-PapersOnline*, **51**(5), 79-84 (2018).
 13. Apte, J. S., Bombrun, E., Marshall, J. D., and Nazaroff, W. W., “Global Intraurban Intake Fractions for Primary Air Pollutants from Vehicles and Other Distributed Sources,” *Environ. Sci. Technol.*, **46**(6), 3415-3423 (2012).
 14. Marshall, J. D., Teoh, S. K., and Nazaroff, W. W., “Intake fraction of nonreactive vehicle emissions in US urban areas,” *Atmos. Environ.*, **39**(7), 1363-1371 (2005).
 15. Holnicki, P., Kaluszko, A., Nahorski, Z., and Tainio, M., “Intra-urban variability of the intake fraction from multiple emission sources,” *Atmos. Pollut. Res.*, **9**(6), 1184-1193 (2018).
 16. Luo, Z., Lia, Y., and Nazaroff, W. W., “Intake fraction of nonreactive motor vehicle exhaust in Hong Kong,” *Atmos. Environ.*, **44**(15), 1913-1918 (2010).