



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](#)

석사학위 청구논문

지도교수 전 의 찬

화목난로에서 발생하는
블랙카본의 배출 특성

A Study on the Characteristics of Black Carbon
Emission from Wood Stove

세종대학교 대학원

기후변화협동과정

이 지 영

석사학위 청구논문

지도교수 전 의 찬

화목난로에서 발생하는
블랙카본의 배출 특성

A Study on the Characteristics of Black Carbon
Emission from Wood Stove

이 논문을 석사학위 청구논문으로 제출합니다.

2012.12

세종대학교 대학원

기후변화협동과정

이 지 영

이 논문을 이지영의
석사학위 논문으로 인준함.

2012.12

심사위원장 박 성 규 (인)

심사위원 사 재 환 (인)

심사위원
(지도교수) 전 의 찬 (인)

목 차

제1장 서 론	1
1.1 연구의 배경 및 목적	1
1.2 연구의 범위 및 방법	2
제2장 이론적 고찰	4
2.1 목재연료와 화목난로	4
2.2 목재의 연소 특성	5
2.3 블랙카본의 특성	8
2.4 블랙카본이 기후변화에 미치는 영향	10
2.5 블랙카본 측정 방법	12
2.6 선행연구 고찰	13
제3장 연구방법	15
3.1 화목난로 장치 구성 및 실험 조건	15
3.1.1 화목난로 장치 구성	16
3.1.2 실험 조건	17

3.2 실험 진행 순서 및 시료 채취	18
3.2.1 실험 진행	18
3.2.2 시료 채취 및 분석 방법	19
3.2.3 목재연료의 함수율 측정 방법	21
3.2.4 목재연료의 발열량 및 원소분석 방법	21
제4장 결과 및 고찰	24
4.1 목재연료의 특성에 따른 연소 및 배출 특성	24
4.1.1 목재연료의 특성	24
4.1.2 연소 상태 및 미세먼지 배출 특성	25
4.1.3 블랙카본 배출 특성	31
4.2 블랙카본 배출계수 산정	34
제5장 결 론	37
참 고 문 헌	39
ABSTRACT	44

List of Table

Table 1. Gross calorific value by wood species.....	6
Table 2. Global Warming Potential of climate change causing materials.....	11
Table 3. OC/EC Emissions of oak combustion.....	14
Table 4. Black Carbon emission factors of wood stove.....	14
Table 5. Results of reproducibility test for Calorimeter.....	22
Table 6. Characteristics of wood fuel.....	25
Table 7. Combustion states by stove type and characteristics of wood fuel.....	26
Table 8. Concentration of PM ₁₀ by stove type and characteristics of wood fuel.....	30
Table 9. Concentration of Black Carbon by stove type and characteristics of wood fuel.....	32
Table 10. Concentration of OC/EC by stove type and characteristics of wood fuel.....	33
Table 11. Black Carbon/PM ₁₀ Concentration rate(w/w%).....	34
Table 12. Emission factors of Black Carbon by stove type and characteristics of wood fuel.....	35

List of Figure

Figure 1. Flow diagram of this study.....	3
Figure 2. Major patterns of wood used as energy source.....	5
Figure 3. Combustion process of wood depending on combustion temperature.....	7
Figure 4. Sources of Black Carbon emission.....	9
Figure 5. Effects of Black Carbon on climate.....	10
Figure 6. Schematic diagram of OC/EC analyzer.....	13
Figure 7. US EPA Method 5G - Suggested Construction Details of the Dilution Tunnel.....	15
Figure 8. Experiment chamber for wood stove combustion.....	16
Figure 9. Installing the measuring equipments on the stack.....	17
Figure 10. Wood fuel for experiment.....	18
Figure 11. Standard operating procedure of wood stove combustion	19
Figure 12. Dust collecting equipment.....	20
Figure 13. Results of reproducibility test for Elemental Analyzer.....	23
Figure 14. Exhaust gas temperature of Wood(Oak) A in fireplace.....	27
Figure 15. Exhaust gas temperature of Wood(Oak) B in fireplace.....	28
Figure 16. Exhaust gas temperature of Wood(Oak) C in fireplace.....	28
Figure 17. Exhaust gas temperature of Wood(Oak) A in small wood stove.....	29
Figure 18. Comparison between Black Carbon emission factors in this study and prior research.....	36

논문요약

화목난로에서 발생하는 블랙카본의 배출 특성

전 세계적으로 '기후변화' 현상이 심각해짐에 따라 기후변화를 유발하는 물질에 대한 관심도 높아지고 있다. 기후변화를 유발하는 원인 물질은 CO₂, CH₄, N₂O 등 '온실가스'로 알려져 있으나, 최근 블랙카본이 기후변화 영향 물질로 관심을 받고 있다. 블랙카본(Black Carbon, BC)은 화석연료, 나무를 비롯한 바이오매스 등의 불완전 연소와 직화구이 음식점, 숯가마, 화목난로, 폐기물 노천소각 등 생물성 연소의 불완전 연소에 의해 발생한다. 블랙카본은 CO₂에 비해 대기 중에 체류하는 시간이 짧지만, 지구온난화지수(Global Warming Potential, GWP)가 CO₂의 680배에 해당한다. 이는 동일한 기간 동안 블랙카본이 온실가스에 비해 상당히 큰 온실효과를 나타내는 것을 의미한다.

본 연구에서는 화목난로 사용에 따른 블랙카본의 배출특성을 살펴보기 위해 두 가지 형태의 화목난로와 세 가지 종류의 목재연료를 대상으로 연소 실험을 진행하였다. 건조 정도가 다른 세 가지 종류의 목재연료 함수율은 KS 규격에 따라 측정하였다. 연소 실험 챔버는 US EPA Method 5G를 참고하여 제작하였고, 입자상물질의 채취는 대기오염공정시험법의 먼지측정방법에 따라 실시하였다. 또한, 화목난로 종류 및 목재연료의 종류에 따라 각각 3번씩 총 12번의 실험을 실시하였다.

함수율 측정 결과, 목재연료 A의 함수율은 15.16 %, 목재연료 B의 함수율은 61.08 %, 목재연료 C의 함수율은 79.48 %로 나타났다. 미세먼지 배출농도의 경우, 동일한 조건에서 목재연료 B의 미세먼지 농도가 78.40 mg/m³, 목재연료 C의 농도가 49.26

mg/m³으로 나타났다. 미세먼지의 배출계수는 미세먼지 농도와 유사한 추이를 나타내었으며, 목재연료 B의 미세먼지 배출계수는 2.27 g-PM/kg-Oak, 목재연료 C는 1.46 g-PM/kg-Oak으로 나타났다.

블랙카본의 농도 또한 미세먼지 농도 추이와 비슷한 경향을 나타내었고, 동일한 조건에서 연소실험을 진행한 목재연료 B와 목재연료 C의 블랙카본 농도는 각각 12.67 mg/m³, 9.99 mg/m³으로 나타났고, 블랙카본 배출계수는 각각 0.37 g-BC/kg-Oak, 0.29 g-BC/kg-Oak으로 먼지농도와 비슷한 추이를 나타내었다. 블랙카본 농도는 목재연료 B가 목재연료 C에 비해 약 37 % 더 높게 나타났으나, 미세먼지 농도에 대한 블랙카본의 농도 비율은 목재연료 C가 목재연료 B에 비해 약 20 % 더 높게 나타났다.

화목난로에서 발생하는 블랙카본은 연소시 온도 및 연소 공기량 보다 연소 초기에 영향을 미치는 연료의 함수율에 따라 변화하는 것으로 나타났다. 함수율에 따라 발생하는 블랙카본의 배출특성을 더 자세하게 살펴보기 위해서는 예비 연소 실험에 의해 화목난로에서의 연소 과정을 도출하고, 도출된 연소 단계에 대한 입자상물질 포집 및 분석이 각각 이루어져야 할 것으로 판단된다. 또한, 보다 다양한 연소조건을 설정하여 블랙카본 발생량이 가장 적은 연소방법(SOP)을 작성하여 연소방법에 따른 블랙카본 배출계수를 산정하여 제시할 필요가 있다고 판단된다.

주제어 : Black Carbon , Wood Stove , Biomass Burning ,
Fine Particulate , Climate Change

제1장 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

전 세계적으로 ‘기후변화’가 심각해짐에 따라 기후변화를 유발하는 물질에 대한 관심도 높아지고 있다. 기후변화를 유발하는 원인 물질은 ‘온실가스’로 알려져 있으며, 주로 화석연료의 연소에 의해 발생한다(Nordica, 2007). 현재 전 세계가 기후변화현상을 완화하기 위하여 이들 온실가스감축에 초점을 맞추고 이를 위한 정책 및 기술개발을 위해 노력하고 있다. 우리나라도 2008년 8월 ‘저탄소 녹색성장’이라는 새로운 국가 패러다임을 제시하여 기후변화에 적극 대응하고 있다. 저탄소 녹색성장 국가 전략에는 효율적인 온실가스 감축 및 탈석유·에너지자립 강화 등의 기후변화 적응 및 에너지 자립전략, 녹색 기술 개발 및 녹색경제 기반 조성을 통한 신성장동력 창출 전략, 생활의 녹색혁명을 통한 삶의 질 개선과 국가 위상 강화 전략을 포함하고 있다.

온실가스와 더불어 기후변화에 영향을 미치는 물질로 블랙카본이 관심을 받고 있다. 블랙카본(Black Carbon, BC)은 화석연료, 나무를 비롯한 바이오매스 등의 불완전 연소와(UNEP, 2011) 직화구이 음식점, 숯가마, 화목난로, 폐기물 노천소각 등 생물성 연소의 불완전 연소에 의해 발생한다. 블랙카본은 기관지를 거쳐 폐에 흡착되어 각종 질환을 유발하는 위해오염물질로 알려져 있었으나, 최근의 연구를 통해 온실가스와 더불어 기후변화에 기여하는 원인물질 중 한가지로 알려지면서 블랙카본에 대한 연구가 증가하고 있는 추세이다(서울특별시보건환경연구원, 2011).

블랙카본은 기후과학적인 측면에서 빛을 흡수하는 탄소 성분을 지칭한다. 블랙카본은 눈과 얼음의 표면에 달라붙어 알베도(Albedo)를 감소시키고, 복사에너지 흡수율을 증가시켜 눈과 얼음이 녹는 속도를 가속화한다(US EPA, 2012). 또한 블랙카본은

구름응결핵으로 작용하여 지구 대기복사수지에 영향을 끼치는 간접 기후효과를 나타내기도 한다. 블랙카본은 대기 중에 체류하는 시간이 온실가스에 비해 상대적으로 짧지만 주요 기후변화 원인물질인 CO₂에 비하여 기후변화에 미치는 영향이 상당히 크게 나타나고 있어 이에 대한 대응이 필요한 상황이다(이시혜 외, 2010).

따라서 본 연구에서는 기후변화 원인물질 중 하나인 블랙카본의 화목난로에서의 배출특성을 살펴보고자 한다. 그리고 연소 조건 및 연료 종류에 따른 블랙카본의 배출특성을 분석하고 블랙카본의 제어 대책 수립의 기초자료로 제시하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구에서는 기후변화 원인물질 중 하나인 블랙카본의 배출특성을 파악하기 위하여 화목난로를 대상으로 연소실험을 진행하고, 연소조건에 따른 블랙카본의 배출특성을 살펴보고자 한다. 이를 위한 본 연구의 방법 및 절차는 다음과 같다.

1. 문헌조사를 통해 목재연료와 화목난로, 목재연료의 연소 특성을 살펴보고, 블랙카본의 일반적 특징 및 기후변화에 미치는 영향 등을 고찰한다.
2. 블랙카본 측정을 위한 화목난로 연소 실험장치를 구성하고, 연소 실험을 진행한다. 연소 실험시에는 연소시 배출되는 배출가스의 온도를 측정하고, 입자상 물질을 채취한다. 또한, 목재연료의 특성을 파악하기 위하여 발열량, 원소분석, 함수율 측정을 실시한다.

3. 화목난로 종류 및 목재연료의 함수율에 따른 블랙카본의 배출농도 및 배출계수를 산정하고, 이를 각각의 실험조건별로 비교 분석한다. 또한 본 연구의 결과를 선행연구 결과와 비교하여 제시한다.

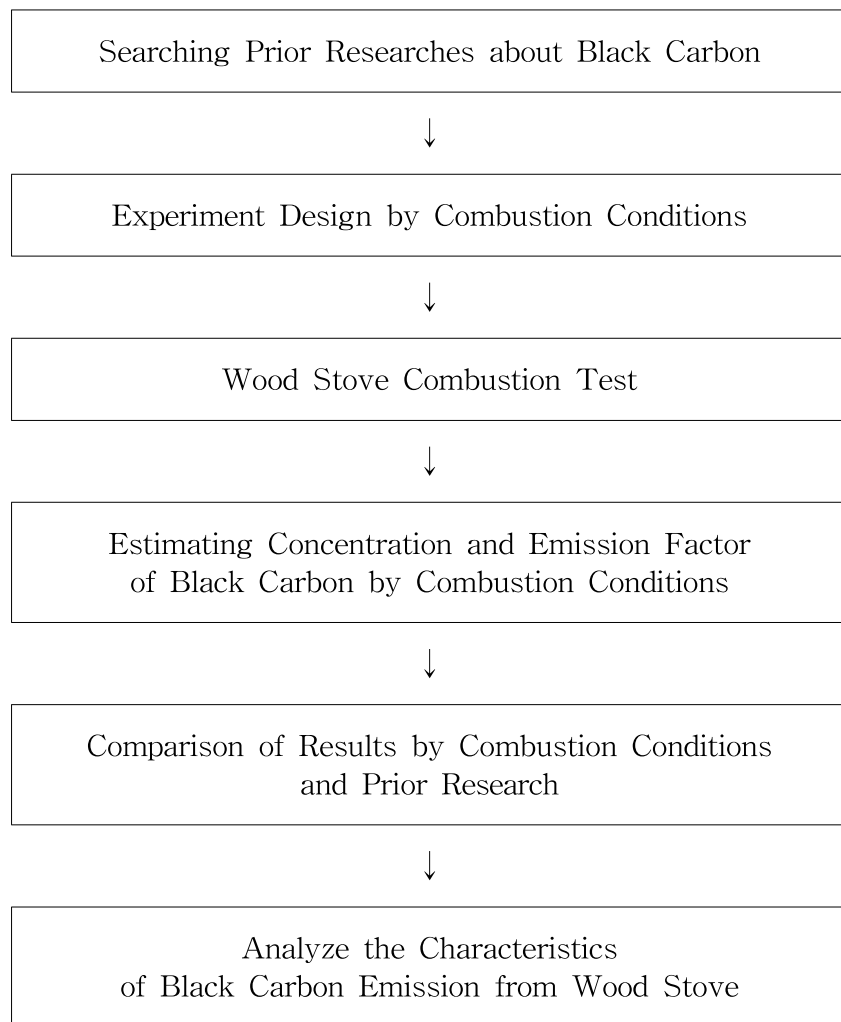


Figure 1. Flow diagram of this study

제2장 이론적 고찰

2.1 목재연료와 화목난로

기후변화현상이 심각해지고 온실가스 배출량이 지속적으로 증가함에 따라 화석연료를 대체하는 친환경 에너지원에 대한 관심이 높아지고 있다. 바이오매스는 가격이 저렴하고 온실가스 배출량을 제외하도록 하고 있어 태양광, 풍력, 수력 등의 신·재생 에너지와 더불어 대체 연료로 사용량이 증가하고 있는 추세이다. 선진국에서는 경제적이고 친환경적인 바이오매스를 에너지로 사용하도록 하는 정책을 시행하고 있으나, 우리나라에서는 바이오매스 자원의 공급 부족과 사용의 불편성 때문에 아직도 화석연료에 대한 의존도가 높은 실정이다. 그러나 최근 유가 상승에 의해 농산촌 지역의 가계 부담이 증가하면서 목질 바이오매스의 직접 연소를 통해 에너지를 얻는 화목난로에 대한 관심이 높아지고 있다(한국농촌경제연구원, 2005).

목재를 연소하는 경우 발생하는 CO₂의 양은 난방유의 8.3 %, 천연가스의 10 % 수준이지만(경기개발연구원, 2009), 바이오매스의 경우, 이들의 연소로부터 발생하는 CO₂ 배출량은 원래 대기 중에 있던 것을 광합성 작용으로 흡수한 양을 배출하는 것이므로 온실가스 배출 통계에 포함하지 않아 탄소중립적(carbon-neutral)이다(IPCC, 2006). 목재는 장작으로 바로 사용하거나 사용이 용이하게 가공하여 연료로 사용할 수 있는데, 주로 사용되는 목재연료의 형태는 장작과 펠릿, 목재칩 등이 있다.

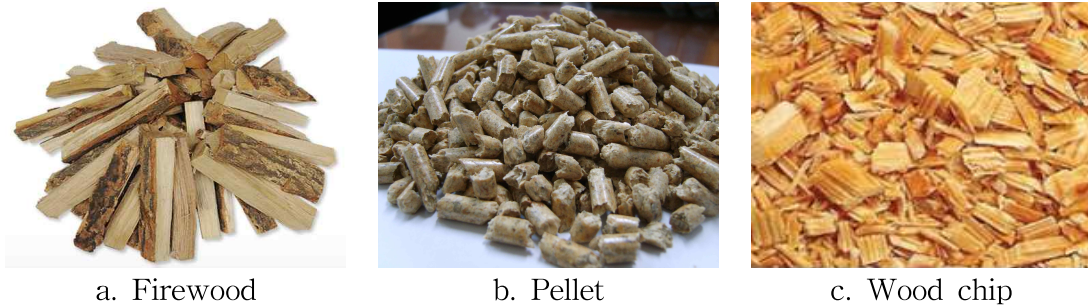


Figure 2. Major patterns of wood used as energy source

보조열원공급 및 실내장식용으로 가정집, 산막등지에서 주로 사용되고 있는 난로는 크게 구조물 내부에 벽돌로 설치된 벽난로와 적절한 도관공사로 된 조립식 난로의 두 종류로 나눌 수 있다. 복사열에 의해 방을 가열하는 벽난로는 연소열의 상당량이 배기가스 또는 벽난로 벽을 통해 손실되어 열효율이 조립식 난로에 비해 낮다. 또한 벽난로는 높은 과잉공기와 2차 연소 공기의 부재로 인해 비연소 가연성 물질이 상당량 발생하는 것으로 알려져 있다. 난로에서 발생하는 입자상 물질의 일부는 원소탄소와 목재로 된 고체 입자를 포함하며, 입자상 물질의 대부분은 미세입자(PM_{10})로 구성된다(환경처, 1993).

2.2 목재의 연소 특성

목재의 연소는 목재가 공기 중의 산소와 화학적으로 반응하여 열과 빛을 내면서 타는 산화현상이다. 연소는 가연성 물질이 불꽃을 내면서 타는 잔염(after flame)과 불꽃이 소멸한 후 남아있는 탄화물이 불꽃이 없는 상태에서 계속 타는 현상인 잔진(after grow)으로 구분할 수 있다.

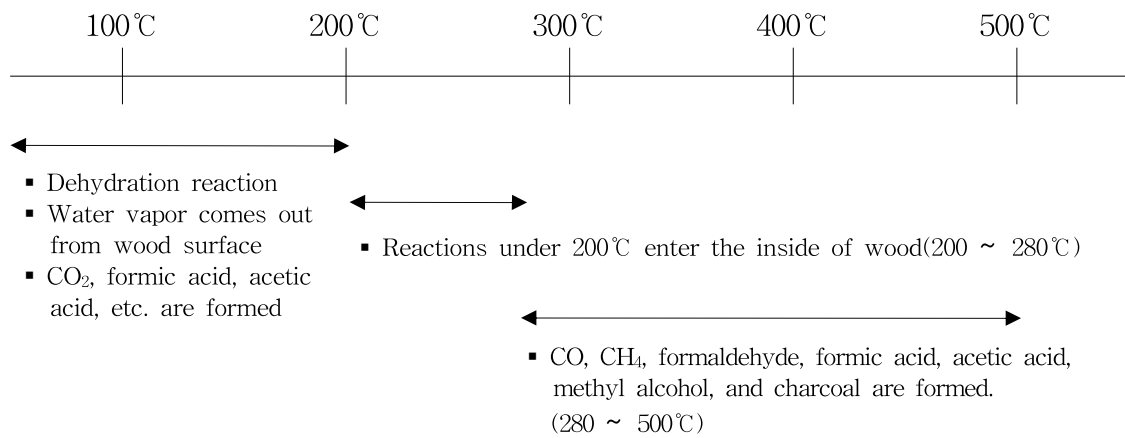
Table 1. Gross calorific value by wood species

Species	Gross calorific value(kcal/kg)
Douglas-fir	4,580 ~ 5,030
Fir	4,440 ~ 4,650
Pine	4,780 ~ 6,790
Spruce	4,500 ~ 4,700
Alder	4,300 ~ 4,440
Beech	4,500 ~ 4,870
Birch	4,650 ~ 5,190
Maple	4,180 ~ 4,670
Oak	1,390 ~ 5,280
Poplar	4,120 ~ 5,350

* Source : Korea Institute of Fire Industry & Technology(2010)

목재의 연소 초기에는 온도가 상승하고, 열분해가 진행됨에 따라 휘발성분을 생성한다. 온도가 250 ~ 290℃가 되면 열분해 생성물이 많아지면서 불꽃이 생성되고, 350 ~ 450℃가 되면 자연착화하게 된다. 목재를 상온에서부터 가열하는 경우, 목재내의 수분이 증발하여 100℃에서는 목재 내의 수분이 모두 증발된 전건상태에 이르게 된다. 150℃에 이르면 목재 표면의 색깔이 흑갈색으로 변하고, 200℃에 이르면 열분해가 일어나 H₂O, CO₂ 등의 불연성 가스와 CO, CH₄, C₂H₄, H₂, 알데히드, 케톤, 유기산 등의 가연성 가스가 생성된다. 이러한 목재의 연소는 목재의 열전도율, 비중, 함유성분, 함유수 및 단면적, 공기조건 및 가열조건에 따라 영향을 받는다(소방산업기술연구소, 2010).

목재의 열분해에 의해 탄소와 타르, 가스가 생성되며, 타르는 분해되어 가연성 가스를 방출시키면서 화염을 발생시키게 된다. 목재의 발염연소는 목재 주위에 가연성 혼합기층이 형성되었을 때 점화시 필요한 착화원이 존재해야 가능하다. 가연성 혼합기층은 열분해물의 생성속도가 대기 확산 속도보다 더 빨라야 하며, 연소가 지속적으로 진행되기 위해서는 열분해 생성물이 소비속도보다 더 빠른 속도로 발생해야 한다 (소방산업기술연구소, 2010).



* Source : Korea Institute of Fire Industry & Technology(2010)

Figure 3. Combustion process of wood depending on combustion temperature

2.3 블랙카본의 특성

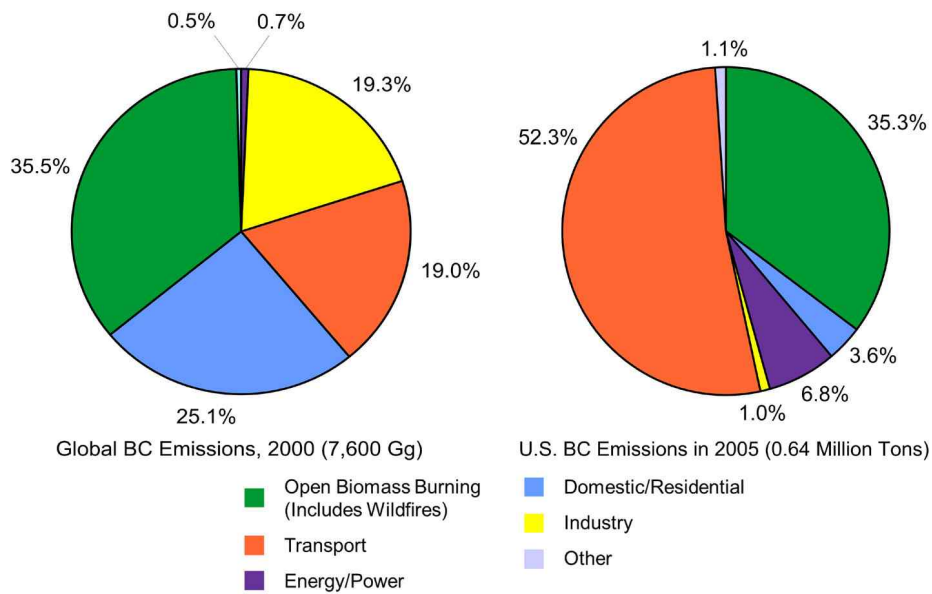
대기 중 입자상 물질의 탄소성분은 화석연료의 불완전연소와 대기 중에서의 2차 광화학 반응으로 생성되며, 부유 입자상 물질의 주요 구성 성분중 하나이다. 입자상 물질의 탄소성분은 정량화 방법에 따라 다양하게 불리어진다.

블랙카본은 검댕이라고도 불리어지는 'Soot', 'Soot Carbon', 'Brown Carbon', 빛을 흡수하는 탄소성분 에어로졸인 'Light-Absorbing Organic Matter', 열화학적 분류에 의한 'Elemental Carbon', 광학적인 특성에 의해 빛의 흡수정도로 구분되는 'Equivalent Black Carbon' 등 다양한 단어로 지칭되고 있으나, 기후과학적인 측면에서의 블랙카본은 주로 빛을 흡수하는 탄소성분으로 정의된다(서울특별시보건환경연구원, 2011).

US EPA의 'Report to congress on Black carbon(2012)'과 Copenhagen Consensus Center의 'A analysis of Black Carbon mitigation as a Response to climate change(2009)'에서는 EC(Elemental Carbon)만을 블랙카본으로 정의하고 있으며, Woodrow Wilson School의 'Black Carbon - A review and Policy Recommendation(2009)'에서는 EC와 OC(Organic Carbon) 두 가지를 함께 블랙카본으로 정의하고 있다.

인간 건강에 나쁜 영향을 미치는 유해대기물질이며 에어로졸의 성분 중 하나인 블랙카본은 황산염 및 질산염, 유기탄소(Organic Carbon, OC)를 포함하는 입자상 물질 중에서 질량단위당 태양에너지 흡수율이 가장 높은 것으로 알려져 있다(US EPA, 2012). 또한, 블랙카본은 검댕의 주요 성분으로 유기탄소를 포함하는 빛 흡수 복합물질이기도 하다. 블랙카본은 미세입자의 형태로 대기에 직접 배출되며, 인간 건강 및 생태계, 시정(視程)에도 영향을 미친다.

미세입자인 블랙카본은 기관지를 거쳐 폐에 흡착되어 건강 및 환경, 기후변화에 큰 영향을 미치는 주요 요소 중 하나이다. 빛을 흡수하는 입자 중 가장 강력한 성분인 블랙카본은 화석연료와 바이오연료, 바이오매스의 불완전 연소로 인해 발생한다. 주로 자연적으로 발생하는 화재를 포함하는 바이오매스의 노천소각 및 주거에서 발생하는 블랙카본은 바이오매스 노천소각에서 42 %, 주거에서 24 %, 교통에서 24 %, 산업 및 전력생산에서 10 %의 비율로 발생한다(Copenhagen Consensus Center, 2009).

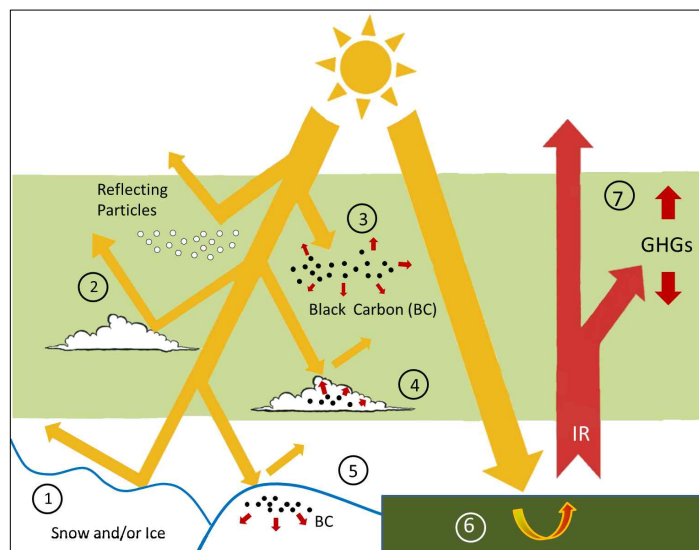


* Source : US EPA(2012)

Figure 4. Sources of Black Carbon emission

2.4 블랙카본이 기후변화에 미치는 영향

최근 연구에 따르면, 블랙카본은 여러 형태로 기후변화에도 영향을 미치는 것으로 알려졌다. 대기 중에 부유하고 있는 블랙카본은 지구내로 들어오는 태양에너지를 흡수하여 대기의 온도를 상승시키고, 구름 사이에 포함되어 있는 블랙카본은 구름이 반사하는 태양에너지를 흡수하여 구름의 알베도를 감소시킨다. 구름 사이에 존재하는 블랙카본이 흡수한 에너지에 의해 따뜻해진 구름은 그렇지 않은 구름에 비해 대기에 존재하는 시간이 짧아지게 된다(Copenhagen Consensus Center, 2009). 블랙카본은 눈과 얼음의 표면에 달라붙어 눈과 얼음의 알베도를 감소시키고 흡수율을 증가시켜 결과적으로 눈과 얼음이 녹는 속도를 가속화한다(US EPA, 2012). 또한, 블랙카본은 구름 응결핵으로 작용하여 구름방울의 크기 및 두께의 변화를 유발하고 지구 대기복사수지에 영향을 끼치는 간접 기후효과를 나타내기도 한다(이시혜 외, 2010).



* Source : Copenhagen Consensus Center(2009)

Figure 5. Effects of Black Carbon on climate

생물성 연소에 의해 배출되는 블랙카본은 대기 중에서 열을 흡수할 뿐만 아니라, 단기적 도심 기온 상승을 유발하는 열섬효과를 유발할 수 있다고 알려지고 있다(서울특별시보건환경연구원, 2011). 또 온실가스 보다 블랙카본에 의한 기온 상승은 기후변화 더 크게 작용할 수 있다는 보고도 있다(Ramanathan, 2008; 월드워치연구소, 2009).

일정기간(100년)동안 온실효과를 유발하는 물질의 온실효과 영향 정도를 이산화탄소(CO₂)를 기준(=1)으로 하여 상대적으로 나타낸 값을 지구온난화지수(Global Warming Potential, GWP)라고 한다. <표 2>에서 보는 바와 같이, CH₄ 와 N₂O의 GWP는 각각 21, 310이며, 블랙카본은 680으로 나타난다. 이는 동일한 기간 동안 블랙카본이 CO₂ 및 CH₄, N₂O에 비해 상당히 큰 온실효과를 나타냄을 의미한다(Copenhagen Consensus Center,2009).

Table 2. Global Warming Potential of climate change causing materials

Materials	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Black Carbon	HFCs	PFCs	SF ₆
GWP	1	21	310	680	140 ~ 11,700	6,500 ~ 9,200	23,900

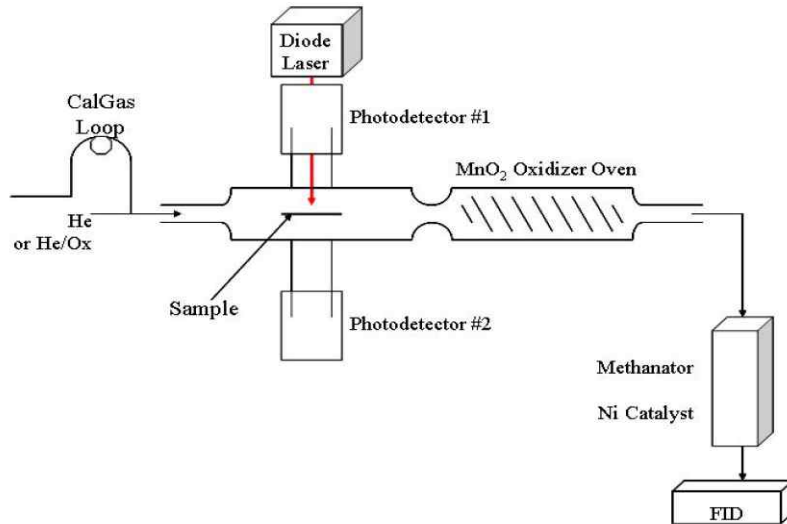
* GWP of GHGs : SAR

* GWP of BC : Copenhagen Consensus Center(2009)

2.5 블랙카본 측정 방법

블랙카본의 측정방법에는 실시간 측정 장비를 이용한 연속측정방법과 유기탄소/원소탄소(OC/EC)분석기를 이용한 측정방법이 있다. 연속측정은 Aethalometer를 이용하여 실시간으로 블랙카본의 농도를 측정하는데, 이러한 측정방법은 전 세계적으로 장거리 이동오염물질 및 기후변화 연구 등에 사용되고 있다. Aethalometer는 실시간으로 배출가스 샘플을 수집하여 석영필터를 통과한 빛의 감쇄 변화를 블랙카본의 질량 농도로 변환시키는 원리로 작동하며, 이 때 블랙카본이 빛의 감쇄를 유발한다(정정훈, 2010). 현재 우리나라 국립환경과학원 백령도 측정소에는 Single Particle Soot Photometer(SP2) 장비를 이용하여 배경대기 중 블랙카본의 입자개수농도 및 크기 분포를 시간단위로 측정하는 연구를 진행하고 있다. SP2 장비는 레이저 빔을 통과하는 입자의 에너지 흡수과정에서 배출된 복사에너지를 통해 블랙카본 농도 값을 계산하는 방식을 사용한다.

OC/EC분석기를 이용하여 블랙카본을 측정하는 방법에는 TOT(Thermal Optical Transmittance)방법과 TOR(Thermal Optical Reflectance)방법이 가장 정확한 분석방법으로 알려져 있다. TOT방법은 순수 헬륨대기 중에서 온도를 600℃까지 단계적으로 가열한 다음 400℃까지 온도를 내린 후, 2% 산소를 가하여 다시 600℃까지 가열하여 분석하는 방법이다. OC/EC 분석은 0.5 ~ 1.5 cm²의 원형으로 펀칭된 시료를 히터 코일 사이의 석영유리튜브에 밀어 넣는 막대를 이용, 세라믹 지지대에 놓고 가열하여 방출되는 탄소성분을 912±5℃에서 이산화탄소로 산화에 의해 이산화탄소로 전환하는 방식으로 이루어진다. 이렇게 전환된 이산화탄소는 420±5℃에서 니켈촉매에 의해 메탄으로 환원되어 FID 검출기를 통해 메탄의 양으로 정량화 되어 나타난다(국립환경과학원, 2010).



* Source : National Institute of Environmental Research(2010)

Figure 6. Schematic diagram of OC/EC analyzer

2.6 선행연구 고찰

목재연료의 연소에 의해 발생하는 블랙카본 배출계수에 관련된 선행 연구를 고찰하였다. Schmidl et al.(2008)과 Fine et al.(2004)은 화목난로에서 목재연료의 종류별로 연소하였을 때 발생하는 카본물질의 배출량을 질량분율로 제시하고 있다. 두 연구에 따르면 화목난로에서 참나무 장작 연소시 발생하는 EC의 양은 미세먼지 무게에 대한 질량비율로 10.4 ~ 15.0 %, OC의 양은 48.1 ~ 55.1 %이다.

목재연료의 연소에 의해 발생하는 블랙카본 배출계수에 관한 연구는 대부분 인도와 중국, 아시아를 중심으로 이루어지고 있으며, 우리나라는 목재류의 블랙카본 관련 연구가 미흡한 상태이다. 화목난로에서 발생하는 블랙카본의 배출계수를 조사하여 <표 4>에 제시하였다.

Roden and Bond(2006)의 연구에서는 아궁이에서 목재연료 연소시 발생하는 EC와 OC의 배출계수를 각각 1.5 ± 0.3 g/kg, 4.0 ± 0.9 g/kg으로 제시하였으며, Li et al.(2009)의 연구에서는 화목난로 연소시 발생하는 OC와 BC의 배출계수를 각각 1.14 ± 0.4 g/kg, 1.49 ± 0.69 g/kg으로 제시하고 있다. 또한 Bond and Sun(2005)의 연구에서는 화목난로에서 목재연료 연소시 발생하는 BC의 배출계수를 0.7 g/kg으로 제시하고 있다.

Table 3. OC/EC Emissions of oak combustion

Wood Type	Emission (Wt% of fine particle)		Source
	EC	OC	
Oak	15.0	48.1	Schmidl et al.(2008)
White Oak	10.4 ± 0.8	55.1 ± 3.6	Fine et al.(2004)

Table 4. Black Carbon emission factors of wood stove

Emission Source Categories	Emission Factor(g/kg)			Source
	EC	OC	BC	
Wood Burning Cookstoves	1.5 ± 0.3	4.0 ± 0.9	-	Roden and Bond.(2006)
Wood Stoves	-	1.14 ± 0.4	1.49 ± 0.7	Li et al.(2009)
Wood Stoves	-	-	0.7	Bond and Sun.(2005)

제3장 연구방법

3.1 화목난로 장치 구성 및 실험 조건

본 연구에서는 화목난로 사용에 따른 블랙카본의 배출 특성을 살펴보기 위하여 두 가지 형태의 화목난로와 세 가지 종류의 목재연료를 대상으로 연소 실험을 진행하였으며, US EPA Method 5G의 방법을 참고하여 연소 실험 챔버를 제작하였다. 벽난로 연소실험은 연료에 불이 붙는 시점부터 30분 경과 후까지 송풍기를 이용하여 강제급기를 실시하였고, 소형난로 연소실험은 송풍기의 유속을 일정하게 하여 실험이 종료되는 시점까지 강제 급기를 실시하였다.

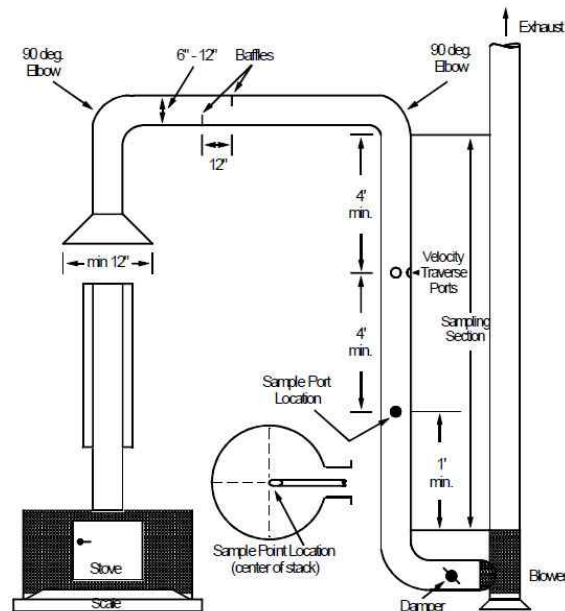


Figure 7. US EPA Method 5G - Suggested Construction Details of the Dilution Tunnel

3.1.1 화목난로 장치 구성

화목난로에서 발생하는 블랙카본의 배출 특성을 살펴보기 위해 US EPA Method 5G를 참고하여 <그림 8>과 같이 실험용 챔버를 설치하였다. 벽난로 실험 챔버는 연소실-후드-덕트 순으로 구성하였다. 연소실의 크기는 가로 1.3 m, 세로 1.3 m, 높이 0.8 m로 설정하였고, 가로 1.5 m, 세로 1.5 m의 크기의 후드를 설치하였으며, 직경 250 mm의 덕트를 사용하여 배출가스가 배출되도록 하였다. 소형난로의 경우 연소실과 덕트를 바로 연결하여 연소가스가 배출되도록 하였으며, 직경 120 mm의 덕트를 사용하였다.

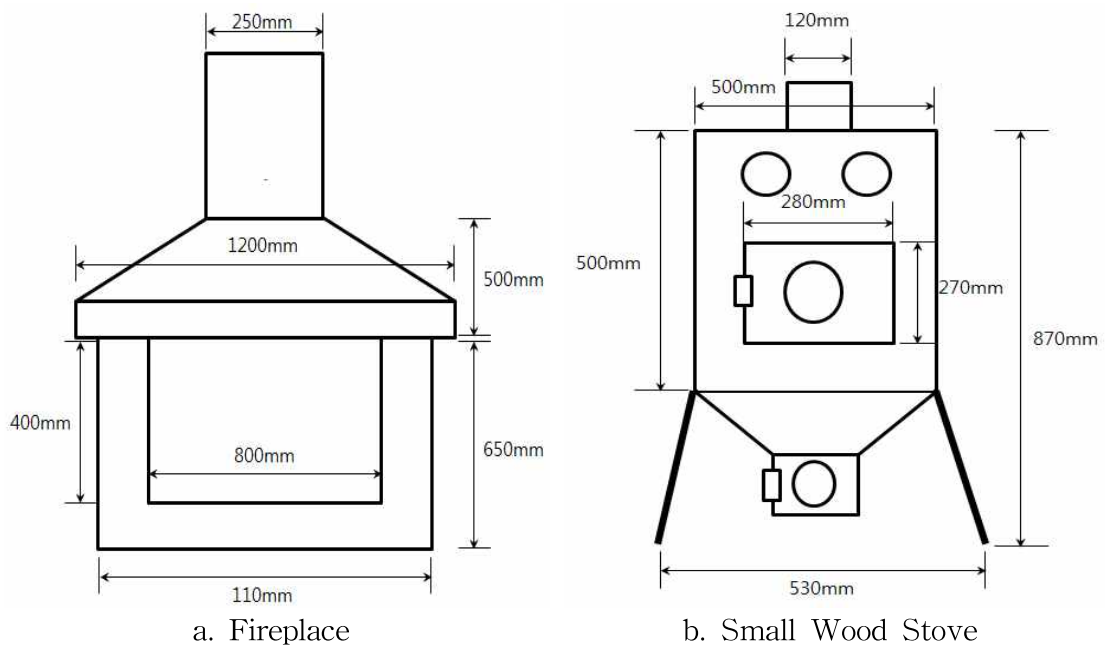


Figure 8. Experiment chamber for wood stove combustion

연소시 배출되는 배출 가스 중 입자상 물질 및 가스상 물질은 덕트에 측정공을 설치하여 시료를 채취하였다. 측정 장비는 스택 샘플러, 온도 측정기, 배출가스 분석기 순으로 설치하였으며, 연소실 내부와 연소실에서 덕트로 바로 배출되는 가스의 온도를 측정할 수 있도록 연소실 내부와 연소실 상부 덕트에도 온도센서를 설치하였다.

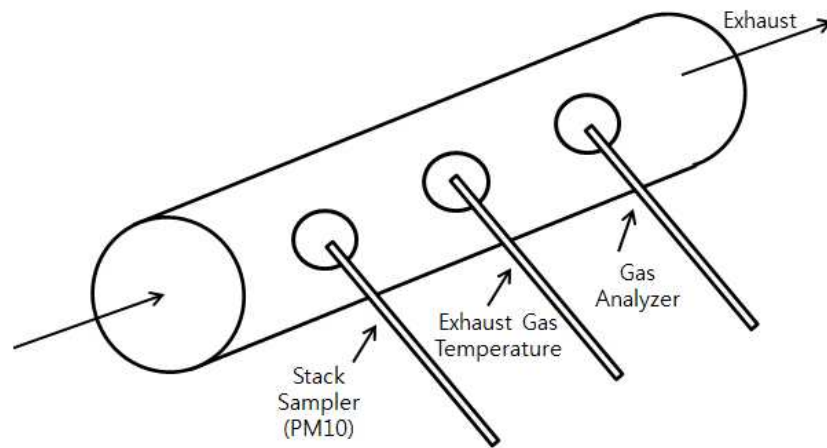


Figure 9. Installing the measuring equipments on the stack

3.1.2 실험 조건

두 가지 형태의 화목난로와 세 가지 목재연료를 사용하여 연소 실험을 진행하였다. 실험에는 길이 35 cm, 직경 약 8 cm의 참나무 장작을 사용하였으며, 다른 세 가지 목재연료의 함수율은 'KS F 2199 목재의 함수율 측정방법'에 따라 측정하였다. 실험은 세 가지 목재연료를 사용한 벽난로 실험과 목재연료 A를 사용한 소형난로 실험으로 구성하였으며, 실험 조건에 따라 각각 3번씩 총 12번의 실험을 실시하였다.

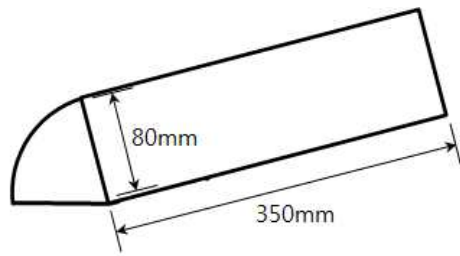


Figure 10. Wood fuel for experiment

3.2 실험 진행 순서 및 시료 채취

3.2.1 실험 진행

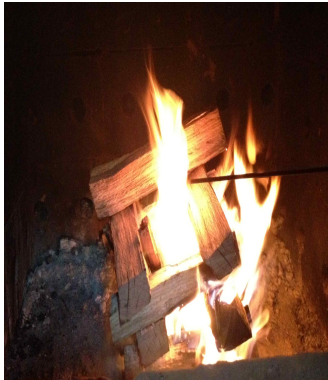
연소실험은 크게 연료의 무게 칭량 → 화목난로에 연료 투입 → 점화 및 연료 연소 → 배출가스 및 미세입자 측정 → 배출가스 및 블랙카본 분석의 순으로 진행되었다. 벽난로 실험은 약 2 kg의 숯과 불쏘시개를 연소실에 투입한 후 1분간 부탄가스 토치(Torch)를 이용하여 숯에 불을 붙이고, 소형 송풍기를 이용하여 점화하였다. 불쏘시개가 착화되면 약 25 kg의 목재연료를 10분 동안 나누어 투입하여 연소하였으며, 착화 후 30분간은 소형 송풍기를 이용하여 연소용 공기를 강제적으로 공급하였다. 소형 난로 실험은 약 1.5 kg의 숯과 불쏘시개를 연소실에 투입한 후 1분간 부탄가스 토치를 이용하여 점화시키고, 10 kg의 목재연료를 30분간 나누어 연소실에 투입하여 연소하였다. 소형난로의 경우, 난로 내부의 연소공기가 부족하여 연소시간이 길어지는 문제점이 발생하여 착화부터 실험이 종료되는 시점까지 소형 송풍기를 이용하여 연소용 공기를 강제적으로 공급하였다. 두 실험 모두 연소 종료시점은 연소불꽃이 사라지고 숯불 형태의 잔불씨만 남는 상태로 설정하였다.



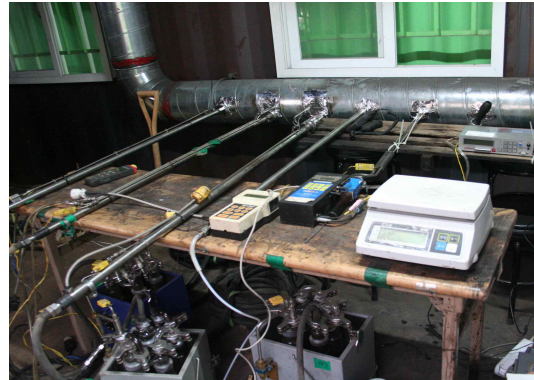
a) Measuring woods weight



b) Inserting and igniting woods



c) Burning woods

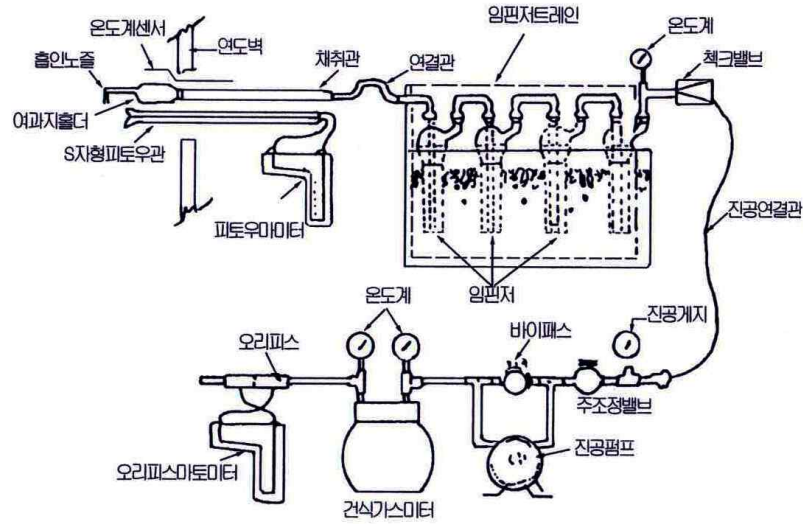


d) Measuring Exhaust gas

Figure 11. Standard operating procedure of wood stove combustion

3.2.2 시료 채취 및 분석 방법

배출가스 중 입자상물질의 시료채취는 우리나라 대기오염공정시험법 ‘ES 01301.1 (먼지) 3’에 따라 수행하였다. 입자상물질 채취 장치는 크게 흡인노즐, 흡인관, 피토우관, 여과지홀더, 임핀저, 가스흡인 및 유량측정부 등으로 구성되며, 스테인레스강 재질의 흡인노즐을 사용하였다. 흡인노즐의 내경은 흡인노즐 안과 밖의 가스 흐름이 일정하게 등속흡인 되도록 환산하여 결정하였다.



* Source : Standard Methods for Examination of Air(2007)

Figure 12. Dust collecting equipment

입자상 물질은 미세먼지를 대상으로 하였으며, 스택 샘플러(CAE Sampling System)에 PM₁₀ Cyclone Kit를 장착하고 90분 동안 연속으로 등속흡인을 실시하여 채취하였다. 시료채취용 여지는 850℃ 도가니에서 120분간 가열하여 탄소성분을 제거한 원형 석영여지(Whatman, QMA, 47 mm)를 사용하였다. 입자상물질의 중량농도는 0.01 mg 단위의 전자저울을 사용하여 시료채취 전·후의 여지무게를 측정하여 계산하였으며, 입자상물질 중 블랙카본의 농도는 원형 석영여지를 OC/EC분석기를 이용하여 분석하였다. 또한 연료의 연소 과정을 살펴보기 위하여 연소실 내부와 연통 내부의 온도를 연소 시작시점부터 연소 종료시점까지 1분 간격으로 측정하였다.

3.2.3 목재연료의 함수율 측정 방법

목재연료의 함수율은 'KS F 2199 목재의 함수율 측정방법'에 따라 측정하였다. 목재의 함수율 측정은 건조와 건조에 따른 무게변화를 측정할 수 있는 수분측정기(MRS 120-3, KERN, Germany)를 사용하였다. 수분측정기의 온도는 103°C로 설정하고, 목재의 질량 변화가 0.01 % 이하가 될 때 까지 약 4시간 동안 건조하였다. 목재 시료의 건조 전·후 질량의 차를 건조 후의 질량으로 나누어 목재연료의 함수율을 산정하였다.

$$\text{함수율(\%)} = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100$$

여기서, m_1 : 시료의 건조 전 질량(g)

m_2 : 시료의 건조 후 질량(g)

3.2.4 목재연료의 발열량 및 원소분석 방법

연료의 발열량(calorific value)은 단위 질량의 물질이 완전 연소할 때 발생하는 열량으로, 연소과정에서 발생하는 수증기의 잠열 포함 여부에 따라 총발열량(gross calorific value)과 순발열량(net calorific value)으로 구분된다(에너지관리공단, 2010). 본 연구에서는 목재연료의 발열량을 발열량 측정기기(IKA-C2000, Germany)를 사용하여 측정하였으며, 표준시료인 Benzoic Acid(IKA, gross calorific value 6320 cal/g, RSD 0.01%)를 사용하여 기기의 정도관리를 실시하였다. 정도관리 결과는 <표 5>에서 보는 바와 같으며, 표준편차가 0.47, 상대표준편차가 0.007%로 높은 재현성을 나타내었다.

연료의 원소분석은 시료를 O₂ 공존하에서 연소시키고 산화와 환원과정을 거쳐서 최종적으로 생성된 CO₂ 및 기타 생성기체를 GC 컬럼으로 각각 분리하여 TCD를 통해 시료 중에 포함되어 있는 탄소(C), 수소(H) 등의 함량을 분석하는 방법이다. 본 연구

에서는 자동원소분석기(Thermo finnigan-Flash EA 1112, USA)를 사용하여 시료 중의 탄소 및 수소의 함량을 측정하였다. 원소분석은 표준시료인 BBOT(C=72.52 %, H=6.09 %, N=6.51 %, S=7.44 %, O=7.43 %)를 사용하여 정도관리를 실시하였으며, 원소분석기기의 정도관리 결과를 <그림 13>에 나타내었다. 표준시료의 탄소함량은 72.41 %, 미시시료의 탄소함량은 72.59 %로 나타났고, 수소함량은 표준시료가 6.07 %, 미시시료가 6.06 %로 분석되어 우수한 재현성을 나타내었다.

Table 5. Results of reproducibility test for Calorimeter

Time	Mass of Standard(g)	Gross Calorific Value(cal/g)
1	0.4952	6,341
2	0.5343	6,341
3	0.5413	6,342
Mean		6,341
SD		0.471
RSD(%)		0.007

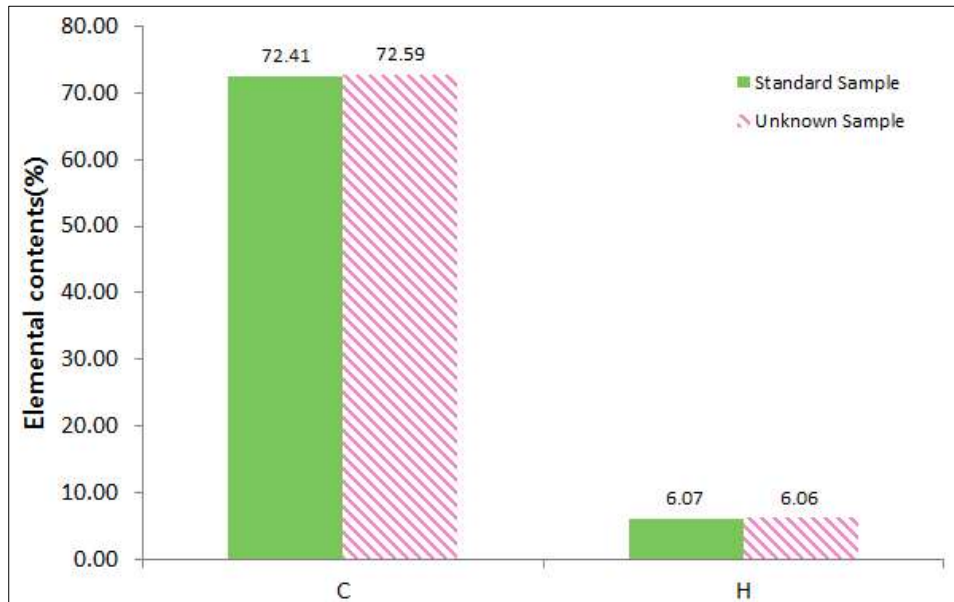


Figure 13. Results of reproducibility test for Elemental Analyzer

제4장 결과 및 고찰

4.1 목재연료의 특성에 따른 연소 및 배출 특성

4.1.1 목재연료의 특성

연료 연소에 따른 배출물질은 연료의 형태, 함수율, 발열량 등의 연료특성에 영향을 받으므로 동일한 종류의 목재연료라도 함수율에 따라 연소시 발생하는 배출물질의 양이 변할 수 있다(한국농촌경제연구원, 2005). 본 연구에서 사용한 세 가지 종류의 목재연료의 특성은 <표 6>에서 보는 바와 같다. 목재연료 A의 함수율은 15.16 %, 목재연료 B의 함수율은 61.08 %, 목재연료 C의 함수율은 79.48 %로 측정되었다. 건식상태 목재연료의 원소분석 결과, 목재연료 A ~ C 모두 약 48 %의 탄소함량과 약 5.9 %의 수소함량을 갖는 것으로 나타났다. 발열량 분석 결과 목재연료에 포함되어있는 부착수분 및 고유수분량을 제외한 건식 발열량은 4,336 ~ 4,461 kcal/kg으로 비슷하게 나타났다으나, 연료의 함수율에 따라 인수식 총발열량 및 인수식 순발열량 값이 크게 차이나는 것으로 나타났다. 인수식 총발열량의 경우 목재연료 A가 3,679 kcal/kg으로 가장 크게 나타났고, 목재연료 B가 1,732 kcal/kg, 목재연료 C가 915 kcal/kg으로 나타났다.

Table 6. Characteristics of wood fuel

Wood Fuel	Moisture Content(%)	Element Content(%)		Gross Calorific Value(kcal/kg)		Net Calorific Value (kcal/kg)	
		C	H	As received	Dry	As received	Dry
Wood(Oak) A	15.16	48.03	5.81	3,679	4,336	3,425	4,022
Wood(Oak) B	61.08	48.27	5.82	1,732	4,450	1,615	4,136
Wood(Oak) C	79.48	48.59	5.99	915	4,461	852	4,138
Average		48.30	5.87	2,109	4,416	1,964	4,099

4.1.2 연소 상태 및 미세먼지 배출 특성

난로에서 배출되는 배출물질은 목재의 특성 및 조작기법 등의 조건에 따라 다르게 나타나며, 일반적으로 연소속도가 빠르고, 화염강도가 큰 경우 2차 연소가 증대되어 결과적으로 오염물질의 배출량이 적게 나타난다. 반면, 연소속도가 느리고 화염강도가 낮은 경우 오염물질의 배출량이 증가한다(환경처, 1993). 따라서 본 연구에서는 화목난로의 형태 및 목재연료의 종류에 따른 연소 온도와 미세먼지의 농도를 살펴보았다.

연소시 배출가스의 평균 온도 및 평균 O₂농도, 평균 CO농도를 <표 7>에 나타내었다. 배출가스의 평균온도는 벽난로에서 목재연료 A를 연소할 때 99℃로 나타났고, 연소조건이 동일한 목재연료 B와 C는 각각 191℃, 272℃로 나타났다. 소형난로에서 목재연료 A를 연소한 경우의 온도는 283℃로 나타났다. 평균 산소량의 경우 벽난로에서 목재연료 A를 연소하였을 때가 19.6 %, 동일한 조건의 목재연료 B, C가 각각 13.5 %,

18.1 %로 나타났으며, 소형난로에서 목재연료 A를 연소하였을 때가 7.07 %로 나타났다. 또한 배출가스 중의 평균 CO농도는 벽난로에서 목재연료 A를 연소하였을 때 986 ppm 이었으며, 동일한 연소조건에서 목재연료 B, C의 경우 1,240 ppm, 1,112 ppm으로 나타났다. 소형난로에서 목재연료 A를 연소하였을 때가 1,259 ppm으로 가장 낮게 나타났다. 또한, 배출가스 중의 산소 농도와 CO농도는 반비례하는 경향을 나타내었다.

동일한 연소조건의 벽난로에서 목재연료 B, C를 연소하는 경우의 결과값을 살펴보면, 불완전연소의 척도인 CO 발생량은 연소온도에 큰 영향을 받는 것으로 판단된다. 또한, 비슷한 평균온도를 나타내는 벽난로의 목재연료 C와 소형난로 목재연료 A의 결과 값을 살펴보면, CO발생량은 연소온도 뿐만 아니라 연소시 공급되는 연소 공기량에도 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

Table 7. Combustion states by stove type and characteristics of wood fuel

Stove Type	Fuel Type	Average Combustion Temperature(°C)	Average concentration of O ₂ (%)	Average concentration of CO(ppm)
Fireplace ¹	Wood (Oak) A*	99	19.6	968
	Wood (Oak) B	191	13.5	1,240
	Wood (Oak) C	272	18.1	1,112
Small Wood Stove ²	Wood (Oak) A	283	7.07	1,259

* Combustion Conditions are different : In Fireplace-Dry Wood Fuel test, combustion air was supplied just 5min.

¹Volume of Fireplace is 0.288m³

²Volume of Small Wood Stove is 0.138m³

화목난로의 종류 및 장작의 종류에 따른 배출가스의 온도그래프를 <그림 14> ~ <그림 17>에 나타내었다. 목재를 상온에서부터 가열하는 경우, 100℃부터는 목재 내의 수분이 모두 증발된 전건상태에 이르게 되므로(소방산업기술연구소, 2010) 목재의 함수율은 목재 연소 초기에만 연소에 영향을 미치고 100℃ 이상에서는 목재의 함수율 이외의 다른 조건이 연소시 배출되는 물질의 양을 변화시키는 것으로 추정된다.

배출가스가 100℃에 도달하는 시간을 살펴본 결과, 벽난로에서 동일한 조건으로 실험을 진행한 목재연료 B와 목재연료 C의 시간이 각각 6분, 7분으로 나타났다. 또한 목재연료 B, C 보다 연소용 공기를 적게 공급한 목재연료 A의 시간은 약 4분으로 가장 짧게 나타났다. 이는 연료 중에 포함되어 있는 수분은 연소 초기에 특정 온도까지 도달하는 시간을 길게 할 뿐, 그 이후의 연소에는 큰 영향을 미치지 않기 때문으로 판단된다.

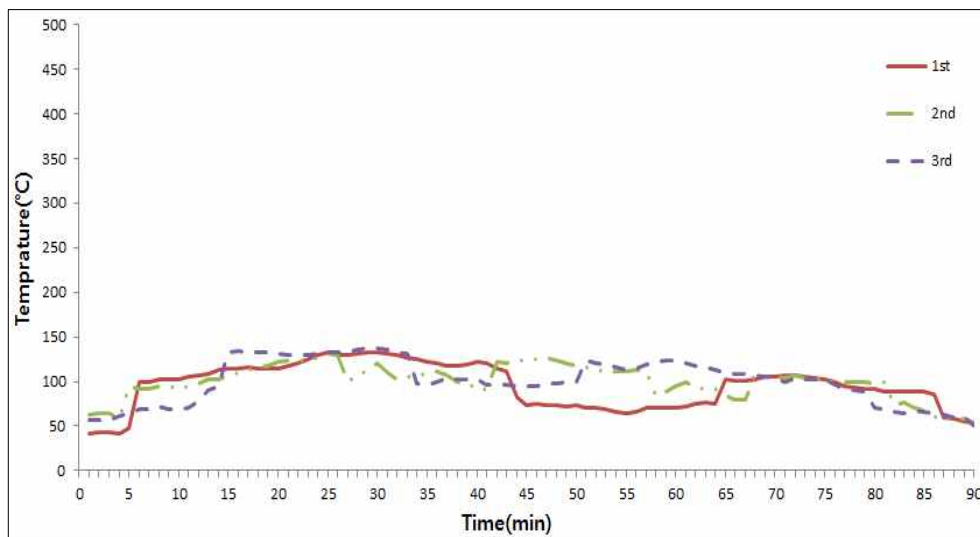


Figure 14. Exhaust gas temperature of Wood(Oak) A in fireplace

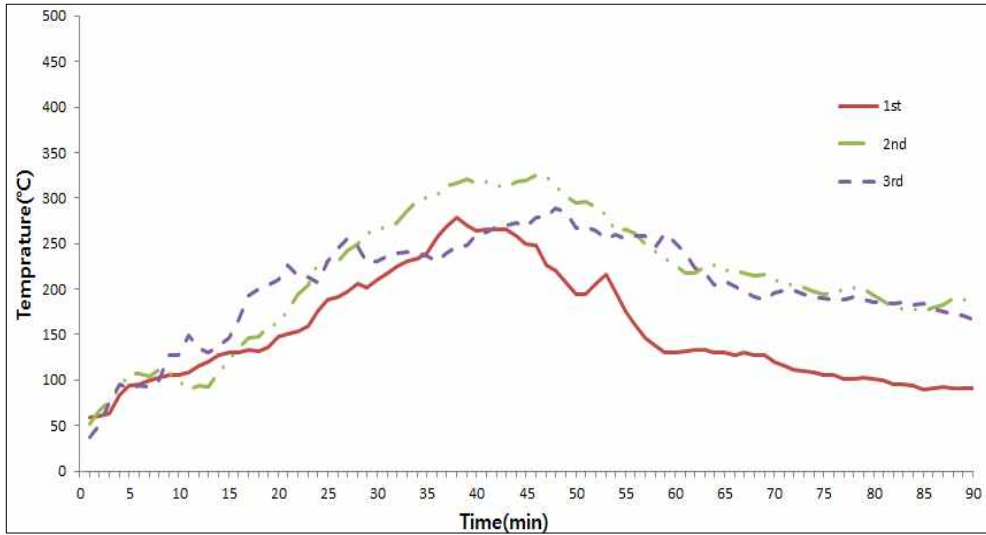


Figure 15. Exhaust gas temperature of Wood(Oak) B in fireplace

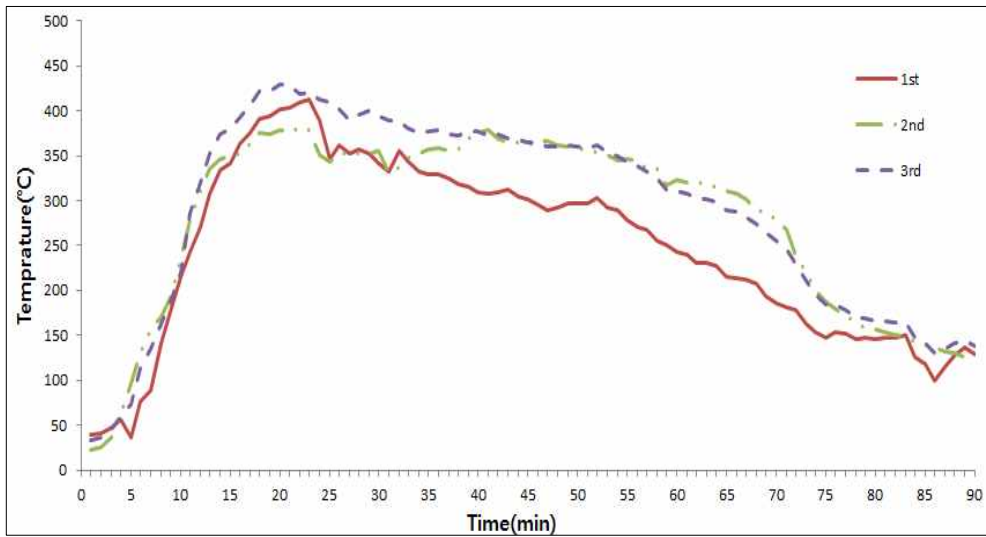


Figure 16. Exhaust gas temperature of Wood(Oak) C in fireplace

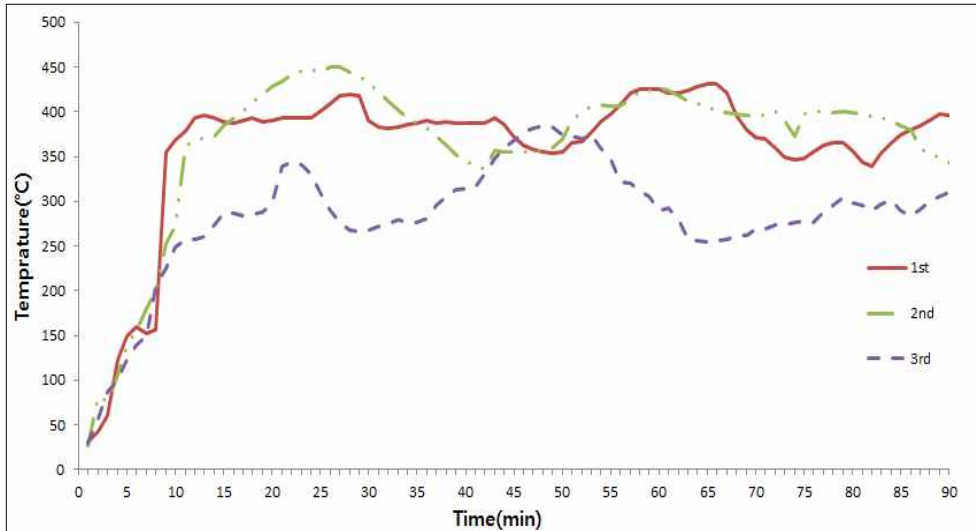


Figure 17. Exhaust gas temperature of Wood(Oak) A in small wood stove

연소시 배출되는 미세먼지 입자 농도 및 배출계수 산정 결과는 <표 8>에서 보는 바와 같다. 동일한 조건에서 실험을 진행한 목재연료 B와 목재연료 C의 미세먼지 농도 산정 결과, 목재연료 B의 미세먼지 농도는 78.40 mg/m^3 , 목재연료 C는 49.26 mg/m^3 으로 나타났다. 목재연료 B와 C의 실험조건에 비해 연소 공기의 공급량이 적었던 목재연료 A의 경우, 미세먼지 농도가 98.23 mg/m^3 로 가장 높게 나타났다. 이는 미세먼지 농도가 온도 조건 및 연소 공기량에 의해 영향을 많이 받기 때문인 것으로 판단된다.

벽난로에서 동일한 연소조건을 적용하여 실험을 진행한 목재연료 B와 목재연료 C의 경우, 목재연료 B의 미세먼지 배출계수는 2.27 g-PM/kg-Oak , 목재연료 C는 1.46 g-PM/kg-Oak 으로 산정되었다. 목재연료 B와 C의 실험조건에 비해 연소 공기의 공급량이 적었던 목재연료 A의 경우, 배출계수가 4.41 g-PM/kg-Oak 로 가장 크게 나타났다. 또한, 소형난로에서 목재연료 A를 연소한 경우의 배출계수는 1.10 g-PM/kg-Oak 으로 가장 낮게 나타났다. 벽난로에서 발생하는 미세먼지의 배출계수

는 미세먼지 농도와 유사한 추이를 나타내었으며, 미세먼지 농도와 마찬가지로 온도 및 연소공기량에 영향을 받기 때문으로 판단된다. 소형난로의 경우 미세먼지 농도는 가장 높고, 배출계수는 가장 낮게 나타났는데, 이는 소형난로의 구조상 연소공기가 충분히 공급되지 않아 난로 내에서 불완전연소가 일어났기 때문인 것으로 판단된다.

Table 8. Concentration of PM₁₀ by stove type and characteristics of wood fuel

Stove Type	Fuel Type	No.	Concentration of PM ₁₀ (mg/m ³)	Emission Factor of PM ₁₀ (g-PM/kg-Oak)	Average Concentration of PM ₁₀ (mg/m ³)	Average Emission Factor of PM ₁₀ (g-PM/kg-Oak)
Fireplace	Wood (Oak) A*	1	91.78	4.15	98.23	4.41
		2	93.69	4.01		
		3	109.22	5.06		
	Wood (Oak) B	1	56.51	1.64	78.40	2.27
		2	102.60	2.93		
		3	76.09	2.23		
	Wood (Oak) C	1	47.41	1.44	49.26	1.46
		2	41.84	1.18		
		3	58.53	1.77		
Small Wood Stove	Wood (Oak) A	1	200.59	0.82	195.08	1.10
		2	156.97	1.08		
		3	227.67	1.40		

* Combustion Conditions are different : In Fireplace-Dry Wood Fuel test, combustion air was supplied just 5min.

4.1.3 블랙카본 배출 특성

본 연구에서는 OC와 EC 두 가지 합한 TC를 블랙카본으로 정의하고, 화목난로의 종류 및 목재연료의 종류에 따른 블랙카본 배출량을 산정하였다. OC/EC 분석 결과는 미세먼지가 포집된 여지를 0.502 cm^2 의 크기로 펀칭하여 단위면적당 발생한 OC/EC의 농도로 나타나므로, 펀칭하기 전 포집여지의 총 면적인 11.3354 cm^2 를 곱하여 포집여지 면적에 대한 농도로 환산하였다. 포집여지 면적에 대한 블랙카본 농도는 <표 9>와 같다. 블랙카본의 농도는 미세먼지 농도 추이와 비슷한 경향을 나타내었으며, 동일한 조건에서 연소실험을 진행한 목재연료 B와 목재연료 C의 블랙카본 농도는 각각 12.67 mg/m^3 , 9.99 mg/m^3 으로 나타났다. 목재연료 B와 C의 실험 조건에 비해 연소용 공기의 공급량이 적었던 목재연료 A의 블랙카본 농도는 22.45 mg/m^3 , 소형난로에서 발생한 블랙카본 농도는 44.26 mg/m^3 으로 나타났다.

블랙카본의 OC와 EC의 단위면적당 농도 및 OC:EC의 비율은 <표 10>에서 보는 바와 같다. OC:EC 비율의 경우, 블랙카본의 농도가 높을수록 OC의 비율이 높아지는 경향을 나타내었다. 블랙카본은 불완전연소율이 높을수록 많이 발생하게 되는데, 이는 불완전 연소가 일어날수록 OC의 발생량 또한 증가하는 것으로 판단할 수 있다.

본 연구에서 산정된 먼지농도에 대한 블랙카본의 농도 비율은 <표 11>에서 보는 바와 같다. 동일한 연소조건에서 실험을 진행한 목재연료 B와 목재연료 C의 경우, 블랙카본 농도는 목재연료 B가 목재연료 C에 비해 약 37 % 더 높게 나타났으나, 미세먼지 농도에 대한 블랙카본의 농도 비율은 목재연료 C가 목재연료 B에 비해 약 20 % 더 높게 나타났다. 이는 미세먼지 농도는 나무의 함수율에 크게 영향을 받지 않으나, 블랙카본의 농도는 나무의 함수율에 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다. 나무의 함수율은 목재연료 중에 포함되어 있는 수분이 모두 증발하기 전인 연소 초기에 영향을 더 크게 미치는 것으로 사료되며, 이에 따라 블랙카본 또한 연소 초기에 더 크게 발생하는 것으로 판단된다.

Table 9. Concentration of Black Carbon by stove type and characteristics of wood fuel

Stove Type	Fuel Type	No.	Concentration of BC (mg/m ³)	Average Concentration of BC (mg/m ³)
Fireplace	Wood (Oak) A*	1	22.35	22.45
		2	21.31	
		3	23.69	
	Wood (Oak) B	1	14.89	12.67
		2	12.95	
		3	10.17	
	Wood (Oak) C	1	10.11	9.99
		2	11.26	
		3	8.59	
Small Wood Stove	Wood (Oak) A	1	51.29	44.26
		2	32.67	
		3	48.82	

* Combustion Conditions are different : In Fireplace-Dry Wood Fuel test, combustion air was supplied just 5min.

Table 10. Concentration of OC/EC by stove type and characteristics of wood fuel

Stove Type	Fuel Type	No.	Concentration of TC(EC+OC) ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	Concentration of OC ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	Concentration of EC ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	OC : EC
Fireplace	Wood (Oak) A*	1	1005.4	706.92	298.48	7:3
		2	846.16	543.41	302.75	6:4
		3	961.32	636.88	324.44	7:3
	Wood (Oak) B	1	748.64	341.92	406.72	5:5
		2	377.09	178.69	198.40	5:5
		3	349.98	160.27	189.71	5:5
	Wood (Oak) C	1	606.77	292.29	314.48	5:5
		2	546.32	232.83	313.49	4:6
		3	439.41	186.75	252.66	4:6
Small Wood Stove	Wood (Oak) A	1	1312.14	1010.67	301.47	8:2
		2	749.42	354.44	394.98	5:5
		3	1119.84	622.73	497.11	6:4

* Combustion Conditions are different : In Fireplace-Dry Wood Fuel test, combustion air was supplied just 5min.

Table 11. Black Carbon/PM₁₀ Concentration rate(w/w%)

Stove Type	Fuel Type	Average PM ₁₀ Concentration (mg/m ³)	Average BC Concentration (mg/m ³)	BC/PM ₁₀ Concentration ratio(%)
Fireplace	Wood (Oak) A*	98.23	22.45	22.85
	Wood (Oak) B	78.40	12.67	16.16
	Wood (Oak) C	49.26	9.99	20.28
Small Wood Stove	Wood (Oak) A	195.08	44.26	22.69

* Combustion Conditions are different : In Fireplace-Dry Wood Fuel test, combustion air was supplied just 5min.

4.2 블랙카본 배출계수 산정

각 실험조건별로 발생한 블랙카본의 평균 농도를 실험시 투입한 연료의 양 및 배기가스량을 사용하여 연료무게에 따른 블랙카본 배출계수를 산정하였으며, 이를 <표 12>에 나타내었다. 벽난로의 블랙카본 배출계수 산정 결과, 동일한 조건에서 실험한 목재연료 B와 목재연료 C의 배출계수는 각각 0.37, 0.29 g-BC/kg-Oak으로 먼지농도와 비슷한 추이를 나타내었다. 목재연료 B, C와 연소용 공기 조건이 다른 목재연료 A의 경우, 평균 배출계수가 1.01 g-BC/kg-Oak으로 가장 높게 나타났고, 소형난로에서 목재연료 A를 연소한 경우 평균 블랙카본 배출계수는 0.25 g-BC/kg-Oak으로 가장 낮게 나타났다.

Table 12. Emission factors of Black Carbon by stove type and characteristics of wood fuel

Stove Type	Fuel Type	No.	Emission Factor of BC (g-BC/kg-Oak)	Average Emission Factor of BC (g-BC/kg-Oak)
Fireplace	Wood (Oak) A*	1	1.01	1.01
		2	0.91	
		3	1.10	
	Wood (Oak) B	1	0.43	0.37
		2	0.37	
		3	0.30	
	Wood (Oak) C	1	0.31	0.29
		2	0.32	
		3	0.26	
Small Wood Stove	Wood (Oak) A	1	0.21	0.25
		2	0.22	
		3	0.30	

* Combustion Conditions are different : In Fireplace-Dry Wood Fuel test, combustion air was supplied just 5min.

본 연구에서 산정된 블랙카본 배출계수 중 소형난로에 대한 블랙카본 배출계수를 Li et al.(2009)의 Wood Stove 배출계수 연구에 제시된 결과 값과 비교하여 <그림 18>에 제시하였다. Li et al.(2009)의 블랙카본 배출계수와 비교한 결과 본 연구의 결과가 Li et al.(2009)의 연구에 제시된 배출계수 보다 약 83 % 낮은 것으로 나타났다.

Li et al.(2009)의 연구의 경우, PM_{2.5}를 대상으로 450℃ 오븐에서 4시간 동안 구워낸 석영필터를 사용하여 입자상물질을 포집하였다. 입자상 물질의 포집은 약 30 ~ 50분 간 16.7 L/min의 흡인유량으로 실시하였으며, 전체적인 실험 조건은 본 연구와 상당 부분 다른 것으로 나타났다. 이러한 실험조건의 차이에 따라 블랙카본 배출계수가 다르게 나타난 것으로 판단된다. 선행연구와 동일한 실험조건에서 실험하여 결과 값을 비교한다면, 보다 비슷한 연구 결과를 얻을 수 있을 것이라 판단된다.

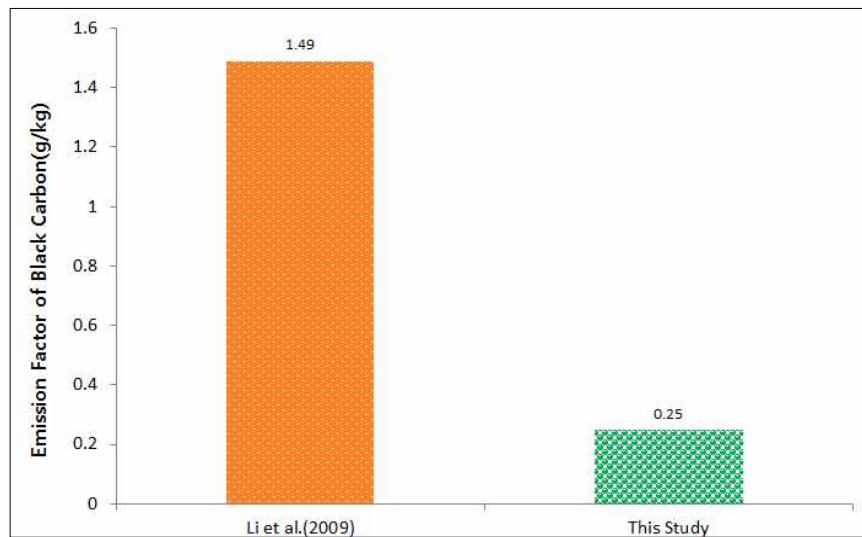


Figure 18. Comparison between Black Carbon emission factors in this study and prior research

제5장 결 론

기후변화현상이 심각해짐에 따라 전 세계는 기후변화 원인물질의 감축을 위한 기술 및 정책을 마련하기 위해 노력하고 있다. 온실가스와 함께 지구온난화에 기여하는 대표적 물질 중 하나인 블랙카본은 주로 생물성 물질의 불완전 연소로 인해 발생한다. 블랙카본은 대기 중에 체류하는 시간이 온실가스에 비해 상대적으로 짧지만 지구온난화 영향은 주요 기후변화 원인물질인 CO₂에 비하여 상당히 크게 나타나고 있다.

본 연구에서는 기후변화 원인물질 중 하나인 블랙카본을 측정하기 위하여 화목난로를 대상으로 연소실험을 진행하고, 연소조건에 따른 온도 및 미세먼지, 블랙카본 등의 배출 특성을 살펴보았다. 목재연료의 특성 분석 결과 목재연료 A의 함수율은 15.16 %, 목재연료 B는 61.08 %, 목재연료 C는 79.48 %로 나타났고, 목재연료 A ~ C 모두 약 48 %의 탄소함량과 약 5.9 %의 수소함량을 갖는 것으로 나타났다. 발열량의 경우, 인수식 총발열량을 기준으로 목재연료 A가 3,679 kcal/kg, 목재연료 B가 1,732 kcal/kg, 목재연료 C가 915 kcal/kg으로 나타났고, 건식 총발열량은 평균 4,416 kcal/kg으로 세 종류 모두 비슷하게 나타났다.

배출가스의 평균온도는 벽난로에서 목재연료 A를 연소할 때가 99℃, 연소조건이 동일한 목재연료 B와 C는 각각 191℃, 272℃로 나타났다. 화목난로에서 목재연료 A를 연소한 경우의 온도는 283℃로 나타났다. 배출가스 중의 평균 CO농도는 벽난로에서 목재연료 A를 연소하였을 때가 986 ppm, 목재연료 B, C가 각각 1,240 ppm, 1,112 ppm으로 나타났으며, 소형난로에서 목재연료 A를 연소하였을 때가 1,259 ppm으로 가장 높게 나타났다. 동일한 조건에서 실험을 진행한 목재연료 B와 목재연료 C의 미세먼지 농도 산정 결과, 목재연료 B의 미세먼지 농도는 78.40 mg/m³, 목재연료 C는 49.26 mg/m³으로 나타났다. 목재연료 B와 C의 실험조건에 비해 연소 공기의 공급량

이 적었던 목재연료 A의 경우, 미세먼지 농도가 98.23 mg/m^3 로 가장 높게 나타났다. 이는 미세먼지 농도는 낮은 온도와 적은 연소공기량 등에 의해 불완전연소가 진행될수록 높게 나타남을 의미하는 것으로 판단된다.

미세먼지의 배출계수는 미세먼지 농도와 유사한 추이를 나타내었으며, 목재연료 B의 미세먼지 배출계수는 2.27 g-PM/kg-Oak , 목재연료 C는 1.46 g-PM/kg-Oak 으로 나타났다. 블랙카본의 농도 또한 미세먼지 농도 추이와 비슷한 경향을 나타내었고, 동일한 조건에서 연소실험을 진행한 목재연료 B와 목재연료 C의 블랙카본 농도는 각각 $12.67, 9.99 \text{ mg/m}^3$ 으로 나타났고, 블랙카본 배출계수는 각각 $0.37, 0.29 \text{ g-BC/kg-Oak}$ 으로 먼지농도와 비슷한 추이를 나타내었다. 그러나 미세먼지 농도에 대한 블랙카본의 농도 비율은 목재연료 C가 목재연료 B에 비해 약 20% 더 높게 나타났다. 이는 미세먼지 농도는 나무의 함수율에 크게 영향을 받지 않으나, 블랙카본의 농도는 나무의 함수율에 더 많은 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다.

실험 결과, 화목난로에서 발생하는 미세먼지는 온도 및 연소공기의 영향을 더 많이 받으며, 블랙카본은 연소 초기에 영향을 주는 연료의 함수율에 영향을 더 많이 받는 것으로 나타났다. 이를 토대로 함수율에 따른 블랙카본 배출 특성을 보다 구체적으로 살펴보기 위해서는 연소가 이루어지는 단계를 파악하고, 각 단계별로 입자상 물질의 포집 및 분석이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

또한, 목재연료의 종류, 난로의 종류, 연소 공기의 공급량, 연료의 점화 방식 등 보다 구체적이고 다양한 조건의 실험을 통해 화목난로에서 배출되는 블랙카본의 특성을 파악해야 할 필요가 있다고 판단되며, 나아가 변화 인자에 따른 블랙카본의 배출계수 및 난로형태에 따른 배출계수를 산정하여 일반화하는 과정의 후속 연구가 필요하다고 판단된다. 이를 통해 화목난로에서 발생하는 기후변화 원인물질 블랙카본을 저감하는 연소 방법을 도출하면 기후변화 완화에도 도움이 될 것이라 판단된다.

참 고 문 헌

강병욱·이학성(2012), Biomass-burning에서 배출되는 미세입자(PM_{2.5})의 배출원 구성 물질 성분비 개발에 관한 연구, 한국대기환경학회지 제28권 제4호, pp.384 ~ 395

국립환경과학원(2011), 고정오염원에서의 유해대기오염물질 배출원조사(VIII) : 비관리형 연소배출원을 중심으로

국립환경과학원(2010), 배경지역(백령도)에서의 대기오염물질 특성 연구(III)

국립환경과학원(2010), PM_{2.5} 배출원 배출목록 작성(II)

국립환경과학원(2009), PM_{2.5} 배출특성 및 기여도 추정연구

경기개발연구원(2011), 생물성연소에 의한 수도권 대기오염물질 배출 분석

경기개발연구원(2011), 목질계 바이오매스의 에너지 활용방안

김사량(2001), 소형 화목보일러의 개발 및 성능시험, 대한기계학회논문집 B권 제26권 제3호, pp.491 ~ 497

김영성(2012), 대도시 유해대기오염물질 관리를 위한 블랙카본 모니터링, 서울도

시연구 제13권 제2호, pp.175 ~ 186

박성규, 최상진, 김진윤, 이호진, 장영기, 봉춘근, 김종호, 황의현(2011), 생물성 연소에서 발생하는 미세먼지 배출계수 개발에 관한 연구 : 고기구이를 중심으로, 한국대기환경학회지 제27권 제4호, pp.426 ~ 435

서울특별시보건환경연구원(2011), 직화구이 음식점에서 배출되는 블랙카본의 제거 기술 개발

소방산업기술연구소(2010), A급 소화모형에 사용되는 목재에 관한 연구

월드워치연구소(2009) 기후의 역습, 환경재단 도요새

에너지관리공단(2010), 발열량 고시개정을 위한 에너지원별 분석 및 연구

이시혜, 김영성, 김상우, 윤순창(2010), PACDEX 캠페인 자료로 분석한 블랙카본을 포함한 축적모드 에어로솔의 구름응결핵 가능성, 한국대기환경학회지 제26권 제4호, pp.380 ~ 391

정노을, 조명란, 허선화, 김형천, 박정민, 이대균, 홍지형, 이석조, 이영재(2012), 노천소각에서 배출되는 먼지 배출계수 산정에 관한 연구, 한국대기환경학회지 제28권 제3호, pp.348 ~ 356

정정훈(2010), 광주 도심지역 측정 검댕 입자의 광학적 산란효과 보상 및 평가, 전남대학교 대학원 석사학위 청구논문

한국농촌경제연구원(2005), 목질 바이오매스 열에너지 개발의 경제성 분석과 에너지용 산림폐재의 지속적 확보방안

한국표준협회(2001), KS F 2199 목재의 함수율 측정 방법

환경부(2007), 대기오염공정시험방법

환경처(1993), 대기오염배출계수(I)

Bond T.C., C. Zarzycki, M.G. Flanner, D.M. Koch(2011), Quantifying immediate radiative forcing by black carbon and organic matter with the Specific Forcing Pulse, Atmospheric Chemistry and Physics, 11, pp.1505 ~ 1525

Bond T.C. and Sun H.(2005), Can reducing black carbon emissions counteract global warming?, Environmental Science Technology, vol.39, pp.5921 ~ 5926

Roden C.A. and Bond T.C.(2006), Emission Factors and Real-Time Optical Properties of Particles Emitted from Traditional Wood Burning Cookstoves, Environmental Science Technology, vol.40, pp.6750 ~ 6757

Copenhagen Consensus Center(2009), A Perspective Paper on Black Carbon Mitigation as a Response to Climate Change

Copenhagen Consensus Center(2009), An Analysis of Black Carbon Mitigation as a Response to Climate Change

Parashara D.C., G. Ranu, T.K. Mandala, A.P. Mitraa(2005), Carbonaceous aerosol emissions from India, Atmospheric Environment, 39, pp.7861 ~ 7871

IGSD(2009), Reducing black carbon may be fastest strategy for slowing climate change, IGSD/INECE Climate Briefing Note

IPCC(2006), 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories

Li, X., S. Wang, L. Duan, J. Hao, and W. Nie(2009), Carbonaceous aerosol emissions from household biofuel combustion in China, Environmental Science & Technology, vol.43(15), pp.6076 ~ 6081.

Reddy M.S. and Venkataraman C.(2002), Inventory of aerosol and sulphur dioxide emissions from India. Part II - biomass combustion, Atmospheric Environment 36, pp.699 ~ 712

MacCarty N., D. Ogle, D. Still, T. Bond, C. Roden, B. Willson(2007), Laboratory Comparison of the Global-Warming Potential of Six Categories of Biomass Cooking Stoves, Aprovecho Research Center

Rick Curktee(2011), Wood Combustion Basics, EPA Workshop, March 2

UNEP and WMO(2011), Ontegrated Assessment of Black Carbon and Tropospheric Ozone

US EPA(2012), Report to Congress on Black Carbon

US EPA(2000), Method 5G - Determination Of Particulate Matter Emissions
From Wood Heaters (Dilution Tunnel Sampling Location)

Woodrow Wilson School(2009), Black Carbon - A review and Policy
Recommendation

ABSTRACT

A Study on the Characteristics of Black Carbon Emission from Wood Stove

Yi, Chi Yeong

Cooperate Course for Climate Change

The Graduate School

Sejong University

As 'climate change' has become a worldwide issue, the level of interest in substances that are attributable for inducing climate change has been growing. Although 'greenhouse gases' such as CO₂, CH₄, N₂O, etc. are known as the source substances that induce climate change, as a result of the recent studies, black carbon has been mentioned often as one of the substances that affect climate change along with the greenhouse gasses. Black carbon occurs due to an incomplete combustion of biomasses such as fossil fuel and wood and biological combustion occurring in places such as direct-fired restaurants, charcoal kilns, wood stoves, waste open burning, etc. Even though black carbon stays in the atmosphere for a shorter period of time than CO₂, its global warming potential

(GWP) is 680 times higher than that of CO₂. This indicates that, during a given time period, black carbon exerts much stronger greenhouse effects than greenhouse gasses.

In this study, in order to investigate the emission characteristics of black carbon caused by the use of wood stoves, combustion experiments were conducted on 2 types of wood stoves and 3 types of wood fuels. The moisture contents of the 3 wood fuels with different dryness were measured in accordance with the KS Standards. The combustion experiment chamber was fabricated by making reference to consideration the US EPA Method 5G, and particulate matter collection was collected according to the particle measurement method of the Standard Methods for Examination of Air. Depending on the wood stove types and wood fuel types, 3 experiments for each of the types, i.e., a total of 12 experiments, were conducted.

As a result of moisture content measurements, the moisture content of the wood fuel A was seen to be 15.16 %, the moisture content of the wood fuel B 61.08 %, and the moisture content of the wood fuel C was seen to be 79.48 %. In the case of fine particle emission concentration, under the same conditions, the fine particle emission concentration of the wood fuel B was shown to be 78.40 mg/m³, wood fuel C was shown to be 49.26 mg/m³. The emission factor of fine particles showed a similar trend as the concentration of fine particles, and the emission factor of fine particles of wood fuel B was seen to be 2.27 g-PM/kg-Oak and for the wood fuel C it was 1.46 g-PM/kg-Oak.

The concentration of Black Carbon also showed a similar tendency as the trend of concentration of fine particles, and the concentration of black carbon for the wood fuel B and wood fuel C, which underwent combustion experiments under the

same conditions, showed 12.67 mg/m³ and 9.99 mg/m³, respectively; and the emission factors of black carbon were 0.37 g-BC/kg-Oak and 0.29 g-BC/kg-Oak, respectively, thereby showing a similar trend as the particle concentration. As for the concentration of black carbon, the wood fuel B was seen to be about 37 % higher than the wood fuel C; and as for the concentration ratio of black carbon for fine particles, the wood fuel C was seen to be about 20 % higher than the wood fuel B.

Black carbon generated from wood stoves was seen to change in accordance with the moisture content of fuel during the initial stage of combustion rather than according to the temperature and the amount of combustion air during combustion. In order to examine more closely the emission characteristics of black carbon that occurs due to the moisture content, it is deemed that combustion process in a wood stove needs to be derived based on a preliminary combustion experiment and the particulate matter collection and the analysis for the derived combustion process would need to be performed. In addition, by setting a wider range of combustion conditions, it is deemed that a combustion method that generates the least amount of black carbon would need to be prepared and the combustion method-specific black carbon emission factors should be calculated and presented.