

미세먼지 저감을 위한 30kW급 친환경 화목보일러의 성능평가 및 환경인증기준 설계

이형돈*† · 정만수**

Development of 30kW Eco-Friendly Wood Boiler and Design Certified Standard by Performance Evaluation for PM Reduction

Hyung Don Lee*†, Man Soo Jung**

Key Words : PM(미세먼지); Eco friendly(친환경); Wood boiler(화목보일러); Performance evaluation(성능평가); Certified standard(인증기준)

ABSTRACT

The wood pellet industry for heating system has been a popular choice as an alternative to oil. Overseas research on firewood boilers is being steadily conducted, mainly in Europe. But locally, there is a need for further research and development for boilers using wood fuel (firewood) for setting environmental standards. In our study, a 30 kW class firewood boiler was developed and performance evaluation (combustion, environmental performance) was conducted. In addition, we designed an environmental certification standard (draft) suitable for the domestic situation by a standardized survey similar to those of domestic and foreign firewood boilers. After analyzing the combustion characteristics of firewood boilers, we have completed the design optimization of controlling more than 50% of the primary air damper and controlling the pyrolysis of heat in secondary air. As a result of analyzing the combustion characteristics for each fuel grade, it was confirmed that there was no significant difference from the EN303-5 quality standard, and the performance difference according to the fuel quality grade was not significant. Subsequently, after evaluating the heating performance, the heating output was 32.3 kW and the heating efficiency was 87.9%. After the environmental evaluation of the second prototype, it was confirmed that the CO concentration was very stable. PM less than 0.5 μm emission in total suspended particles(TSP) gave the highest contribution. Overall, the environmental certification standards for domestic firewood boilers were designed to be under 600 mg/m^3 for CO, under 150 mg/m^3 for NOx, and under 60 mg/m^3 for PM.

1. 서론

목재 등의 바이오매스 연료는 화석연료와 비교 시, 낮은 발열량을 갖고 있고 부피가 커서 연료로서의 가치를 극대화하기 위한 성형가공 등을 통해 연료 품질을 높여야 한다^[1]. 특히 목재를 가공한 목재펠릿(Pellet)은 파쇄, 분쇄 압축, 성형 등의 과정을 거쳐 발열량이 향상되고 보관과 수송을 편리하게 한 연료로서, 국내외 목재펠릿의 연소특성과 환경성을 평가한 많은 연구개발과 관련 표준화에 대한 노력은 현재까지 계속되고 있다^[2-7].

이러한 목재펠릿을 활용한 연료와 제품의 기술개발을 통해 목재펠릿 난방기기는 그 기술력을 높이고 있으며, 이에 맞춘 제품 보급과 판매를 통해 시장에 정착하고 있는 상황이다. 그러나, 단순 목재(화목)연료를 이용한 국내 보일러는 그 활용성과 보급성 측면에서 효율성이 떨어져 연구개발이 미비하며 그 사용 기준과 관련 법·제도도 전무한 상황이다. 화목보일러는 난방과 급탕을 목적으로 하는 목재전용 보일러와 목재와 기름을 동시에 사용하는 겸용 보일러로 구분할 수 있으며, 화목난로는 방열방식에 따라 자연 방열 및 강제

* 한국산업기술시험원 환경기술본부 수소물융합기술센터 (Hydrogen Water Convergence Technology Center, Korea Testing Laboratory)

** (주)큐원테크 (Kyuwon Tech)

† 교신저자, E-mail : kjongro@ktl.re.kr

방열방식으로 구분한다. 2000년대 초부터 우리나라에 보급되어 사용되고 있는 목재난방기기(화목보일러 및 화목난로)는 농·어촌, 산간지역을 중심으로 주위에서 쉽게 구할 수 있는 간벌폐목재, 장작 등을 연료로 사용하고 겨울철의 난방비 절감을 목적으로 보급되어왔다.

특히 목재연료 특성상 수급이 쉽고 연료의 경제적인 측면으로 인해 소비자 수요가 증가하여 매년 수만 대씩 공급되었고, 귀농 귀촌 가구 수 증가로 목재난방기기에 대한 지자체 보조금을 통해 화목보일러 및 화목난로시장이 형성되며 유지되고 있다. 그러나, 이러한 상황에도 불구하고 현재까지 국내 목재난방기기의 제조, 안전기준, 환경기준 등은 아직 마련되어 있지 않은 실정으로 난방기기에 투입되는 목재의 불규칙성과 무분별한 기타 연료(목재 이외 연료, 종이, 폐기물 등 가연성 물질 등) 사용에 따라 난방기기의 화재 및 폭발 등의 사고가 꾸준히 증가하고 있으며, 이에 대한 문제 해결요구가 지속적으로 제기되고 있다. 특히 목재난방기기는 국내 법령에 제조 행위 및 제품에 대한 규제가 전혀 없으며, 지난 몇 년간 일부 용역을 통해 사용실태, 안전 실태에 대해 조사가 되었으나 국내연구는 아주 미흡한 상황이다.

또한 이렇게 무분별하게 사용된 난방기기에서는 단위 열량당 미세먼지 발생량이 매우 높아 환경문제도 꾸준히 제기되고 있다. 이렇게 관리 사각지대에 있는 목재난방기기의 특성에도 불구하고 농어촌에서는 무분별한 제작과 보급으로 인해 성능, 환경, 안전성 측면에서 문제점이 발생되고 있기 때문에, 지금이라도 관련 정부부처(환경부)의 제도개선과 규제 및 관리방안 마련이 시급하다.

한편, 목재난방기기 제조 및 관리에 선진국인 유럽 일부 국가에서는 엄격한 표준규격제정을 통해 제품의 사용 및 보급정책을 추진하고 있다. 펠릿보일러 보급 확대로 1999년 고체연료를 사용하는 보일러에 대한 EN 303-5 표준^[8]을 제정(Class 1~2)하였으며, 현재 기술개발 수준 향상에 따라 Class 5까지 제정되어있고 유사 표준규격도 제정이 완료되어 있다^[9,10]. 위와 같이 목재난방기기의 기술 선진국인 유럽에서는 수요확대 및 엄격한 배출기준 제정에 따라 꾸준한 기술개발과 보급이 이루어지고 있다. 제정된 표준 이외에도 바이오연료 난방장치에 대한 친환경마크/에코라벨 기준(독일 Blue-Angel, 스웨덴, 핀란드 등 북유럽 6개 국가의 Nordic Swan Eco-label 등) 등을 통해 표준규격보다 엄격한 친환경 인증기준을 별도로 마련하여 장치 품질을 향상시키기 위해 노력하고 있다^[11-15].

국내의 경우, 2017년 한국에너지기술평가위원회에서 국가기술표준원을 통해 「70kW 이하 화목보일러에 대한 단체표준」(SPS-B-KEAA0023-7211)^[16]과 「비목재 펠릿보일러에 대한 단체표준」^[17]을 제정하여 보일러 출력, 온도상승, CO, NOx, OGC, 전기안전성 등에 대한 기준을 제시하고 있다. 단체표준의 성능기준은 표준산소농도(10%)에서 CO 1.5%(15,000 ppm) 이하, 먼지 및 OGC 150 mg/m³ 이하이며, 그 수준은

유럽 EN303-5의 인증기준 중 가장 낮은 Class 1~2 수준이다. 이러한 표준 제정에도 불구하고 여전히 목재난방기기 관련 규제가 전무하기 때문에 실제 보급/유통되고 있는 제품이 이 기준을 만족하지 못하고 있는 것이 현실이며, 화목난로의 경우 그 범위가 너무 방대하여 기준조차 정하기 쉽지 않은 상태이다.

이에 본 연구에서는 미세먼지 발생 등 환경성과 안정성에 문제점이 있는 화목보일러의 연소반응 촉진 및 화염안정성 확보를 통해 연소효율의 향상과 연소실 구조개선과 연소제어를 통한 미세먼지 및 CO농도를 저감시킨 전용 난방기기(화목보일러)를 개발하였다. 또한 선진국 수준의 환경기준에 맞도록 목재연료 등급 별 성능평가와 환경성분석을 진행하였으며, 도출된 시험결과와 국내외 환경기준 분석을 토대로 국내 실태에 맞는 환경인증기준안을 설계하고자 하였다.

2. 연구 장치 및 방법

2.1 난방출력 시험

유럽 표준규격인 EN303-5^[8]과 국내 단체표준^[16]의 시험방법에 따라 난방출력 시험을 수행하였다. 전체적인 시험절차는 시험 시작 전 화목보일러가 안정적인 작업의 상태가 되도록 유지한 후, 최소 2시간 이상 보일러의 불판을 지속시켰다. 이후 시험 시작 전 불판을 시각적으로 확인하고 불판 질량 확인 후, 불판에 목재연료(조깅목 500 mm, 약 40 kg)를



Fig. 1 The picture of combustion into wood fuels by wood boiler

Table 1 Properties of wood fuel

Raw basis			Dry basis		
Contents	Unit	values	Contents	Unit	values
Moisture	wt%	27.2	C	wt%	53.3
Volatile matter		60.4	H		5.7
Ash		1.3	O		38.96
Fixed Carbon		11.1	N		0.2
GCV	kcal/kg	3,546	S		0.03
NCV		3,172	Ash		1.8

GCV : Gross calorific value
NCV : Net calorific value

충전한 후 출력시험을 시작하였다. 이때 사용된 화목 연료는 참나무(Fig. 1)이며, 그 연료 성상은 Table 1과 같다.

시험 중 공급수 온도의 평균값은 70~90℃ 사이로 설정하고 공급수와 환수 사이 평균온도차는 10~25 K로 설정하였다. 연료투입 후, 운전시간(2 hr)의 순환 수량, 난방 출구 온도, 난방 환수구 온도를 측정하며 난방 출구 온도, 난방 환수구 온도는 각각 평균값을 기록하였다. 최종적인 난방출력(P_N)은 아래 식(1)에 따라 계산하였다. 여기서 m_1 은 순환수량, c_1 은 물의 비열이며, T_F 와 T_E 는 각각 난방출구온도와 환수구 온도이다.

$$P_N = m_1 \times c_1 (T_F - T_E) \quad (1)$$

P_N : 난방출력 (W)

m_1 : 순환 수량 (kg/s)

$$c_1 : \text{물의 비열} = at \frac{T_F + T_E}{2} \quad (\text{J/kg}^\circ\text{C})$$

T_F : 난방 출구온도 (℃)

T_E : 난방 환수구 온도 (℃)

2.2 난방효율 시험

보일러 불판에 연료 500 mm를 충전한 후, 연료 소모 전 시험 시료의 질량을 측정하고 연료투입 후, 평균 운전시간(2 hr) 이후 연료가 완전히 소모되면 시험시료의 질량을 측정하였으며, 최종적인 난방효율(η_k)을 아래 식(2)으로 계산하였다. 여기서 Q 는 난방출력, Q_B 는 열입력, B 는 연료 소모량, NCV는 연료의 진발열량이다.

$$\eta_k = \frac{Q}{Q_B} \times 100(\%) \quad (2)$$

η_k : 난방효율 (%)

Q : 난방출력 (W)

Q_B : 열입력 ($B \times \text{NCV}$)

B : 연료 소모량 (kg/s)

NCV : 연료의 진발열량 (J/kg)

2.3 연료품질 및 환경성시험

목재연료(화목) 품질시험을 위해 환경부고시 제2020-219호(고형연료제품 품질시험 및 분석방법), ASTM 7582-15로 시험을 진행하였다. 연료 시험분석 항목은 4성분(수분, 휘발분, 회분, 고정탄소), 발열량 2종(고위발열량, 저위발열량) 및 원소(C, H, O, N, S) 성상이다.

1차 환경성 시험은 대기공정시험기준^[18]에 따라 먼지, 가스상오염물질(O_2 , CO, CO_2 , NOx)을 측정하였으며, 모든 분석결과는 표준산소농도로 보정하였다. 입자상오염물질(먼



Fig. 2 Picture of measurement for wood boiler

지)측정은 검교정이 완료된 Grimm 11-D(Germany)장치를 활용하였으며, 계수효율(0.3, 0.5 μm 기준)의 측정불확도는 7.1%(신뢰수준 약 95%, $k=2$)이다. 가스상오염물질은 MRU OPTIMA7(Germany)장치를 이용해 실시간으로 연속 자동 측정하였으며, 검교정이 완료된 장치를 사용하였다. 전기화학식센서를 이용해 각 가스상오염물질을 측정하게 되며, O_2 는 0~21%(0.01%), CO는 0.1~10,000 ppm(1 ppm), NOx는 0~1,000 ppm(0.1 ppm)까지 측정이 가능하고 CO_2 는 비분산 적외선방식으로 0~20%(0.01%)까지 측정이 가능하다. 전체적인 대상 시험설비와 세팅된 시험장치 전경은 아래 Fig. 2에 나타내었다.

2.4. 환경인증기준 설계

국내 화목보일러의 환경인증기준을 설계하기 위해 관련 국내표준, 국제표준, 국제 환경인증기준, 친환경라벨인증 기준 등을 조사하였다. 특히 EN303-5를 비롯하여 국외(유럽 주요 국가 : 독일, 핀란드, 덴마크, 오스트리아 등)의 목재연료(목재, 목재칩, 장작, 펠릿, 브리켓 등) 보일러, 난로 등에 적용되는 다양한 환경표지인증에 대한 기준과 그 기준에 맞는 시험방법/규격문서를 종합분석하였다.

3. 연구 결과

3.1 화목보일러 기본설계

화목연료의 원소성분조성, 발열량(3,172 kcal/kg)과 공기

Table 2 Specification of 1st and 2nd prototype wood boiler

Classification	1 st prototype	2 nd prototype
Picture		
Size	640 x 1400 x 1315	625 x 1290 x 1485
Combustion chamber volume	0.42m x 0.60 m x 0.60 m = 0.153 m ³	0.42 m x 0.56 m x 0.67 m = 0.158 m ³
Capacity of watering	213 L	253 L
Heating surface	3.68 m ²	2.93 m ²
Utility	Manual Damper and ignition	Automatic Damper and ignition

비(m) 1.6을 적용하여 연소공기량, 연소가스량, 이론연소공기량(Ao, Sm³/kg), 습연소가스량(Gw, Sm³/kg)을 계산값으로 활용하였으며, 최대 연료사용량(kg/hr)에 습연소가스량을 곱하여 시간당 최대 배출 가스량(Q)을 산정하였다. 보일러 연소설비는 화격자 면적(m²)과 총 열량(kcal/h)에 화격자 면적을 나누어 면적 열부하(kcal/m²·h)를 산출하고, 연소실 체적(m³)과 체적 열부하(kcal/m³·h)값을 산출하였으며, 여유율을 고려하여 최종 제품설계에 반영하였다.

보일러 구성품인 화격자와 배풍기는 각각 STS 304와 SUS재질을 사용하여 내구성을 확보하였으며, 배풍기는 open형 Fan, 소모전력 100 W, 배출구크기 150 mm, 풍량 5 m³/min으로 설계하였다. 1차와 2차 시제품을 제작하였고, 두 제품은 전열면적, 관수용량, 연관수량, 크기 등에 일부 차이가 있으며, 2차 시제품은 댐퍼방식과 일부 연소공기 최적화를 위한 연소실 구조를 개선하였고 점화장치를 자동방식으로 변경하여 적용하였다. 또한 외관문을 1차 시제품은 2개로 청소 등 유지관리 측면에서 불편하여 2차 시제품은 문을 2개로 개조하였고 연소실 청소와 점화성능을 높였다. 1, 2차 화목보일러의 사양과 특징은 Table 2와 같다.

3.2 연소특성 평가

3.2.1 공기댐퍼 조절에 따른 연소특성

1차 시제품을 대상으로 공기댐퍼 조절에 따른 점화특성과 연소특성 변화에 대한 시험분석결과, 1차 공기댐퍼를 조건별(closed 100%, open 50%, open 100%)로 변화시켰고 2차 공기는 100% open상태를 유지하며, 화염형상을 관찰하고, 연소배가스 O₂ 농도와 CO 농도변화를 분석하였다. 1차 공기댐퍼 조절 비율에 따라 화염의 형상과 연소 특성이 다소 차이를 보이는 것으로 나타났다. Fig. 2에 나타난 화염형상 모

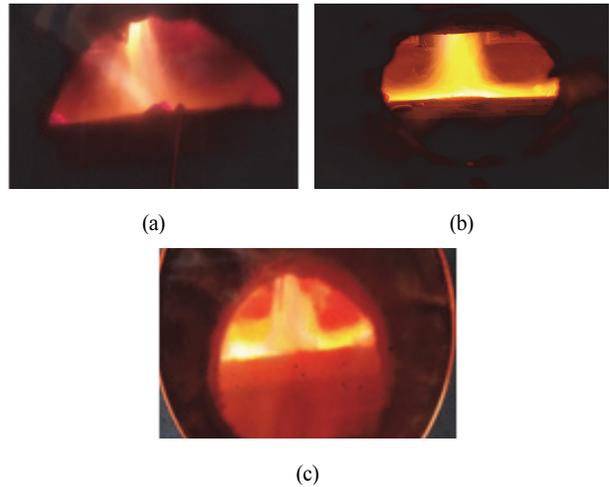


Fig. 3 Picture of flame by controlling air damper (a) 1st air damper close, (b) 1st air damper 50% open (c) 1st air damper 100% open

습과 같이 1차 공기량이 많은 조건에서는 리프팅 현상으로 인해 화염형성이 불규칙하며 최적의 연소조건이 확립되지 않는 것을 확인하였으며, 1, 2차 공기댐퍼를 모두 열었을 경우(Fig. 3 (c)), O₂ 농도 4% 이하, CO 농도 1,000 ppm 이상으로 효율적인 연소가 이루어지지 않는 것으로 나타났다.

특히 연료 점화시는 1차 공기댐퍼에서의 50% 이상의 연소공기가 충분히 확보되어야 비교적 쉽게 점화되는 것을 확인하였고 1차 공기댐퍼 50% 조건에서 화염이 안정적이며 O₂농도 분포가 약 5~7%, CO농도 100~500 ppm로 연소시 안정적인 열분해 조건을 위해서는 2차 공기(후 연소공기)의 역할이 중요한 것으로 나타났다. 다만 지속적으로 2차 공기 비율이 높아지면 O₂ 농도가 12% 이상 상승하며 CO농도가 동시에 증가하는 것을 확인하여 1차 및 2차 공기비의 최적화 조절을 통해 댐퍼홀 크기를 결정하는 것이 필요할 것으로 판단하였다.

3.2.2 연료등급에 따른 연소특성

1차 시제품을 대상으로 연료 등급 2종류(쫄갸목 500mm, 300mm)에 따라 각 연료별 총 8시간 동안 연소 특성시험을 수행한 결과를 Table 3과 Fig. 4에 나타내었다. 모든 결과값은 2시간 이상 평균값으로 계산된 수치이며, CO발생농도가 다소 높은 3, 5, 10차 시험은 화목을 적재하면서 발생된 일부 차이 등에 의해 순간 투입공기량 변화가 발생하여 O₂ 농도가 4% 이하가 되면서 CO 평균농도가 상승한 결과를 나타낸 것이다. 연료 등급에 따른 연소특성을 분석한 결과, 품질이 가장 좋은 연료(A1 등급)를 연소하였을 때, 연소효율이 좋은 것으로 나타났다. 이는 투입되는 화목연료의 양이 일정하고 그 크기가 커서 가스량 발생이 안정적인데 따라 연소특성이 가장 우수한 결과로 판단된다.

Table 3 Results of combustion characteristics by wood fuel grade

Contents	1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th	
	A1(500 mm)					
Fuel consumption (kg/h)	9.48	8.67	10.58	8.15	8.67	
Heating output (kcal/h)	25,941	23,903	25,765	26,825	24,645	
O ₂	%	9.74	8.97	9.37	11.53	11.08
CO ₂		11.32	11.61	11.20	10.9	10.69
CO	ppm	734.4	249.4	448.7	2671.4	2028.9
NO _x		101.89	103.58	90.11	72.91	86.71
Temperature(°C)	114.41	118.71	120.26	120.83	126.25	

Contents	6 th	7 th	8 th	9 th	10 th	
	A1(500 mm)		A2(300 mm)			
Fuel consumption (kg/h)	8.56	9.06	8.86	8.86	7.93	
Heating output (kcal/h)	26,937	25,279	23,657	24,382	23,429	
O ₂	%	9.19	10.08	9.18	8.86	11.53
CO ₂		11.82	11.83	11.43	11.70	10.90
CO	ppm	1252.3	1224.2	253.4	423.7	2671.4
NO _x		105.55	102.25	104.68	109.49	72.91
Temperature(°C)	134.54	126.21	125.71	123.60	119.83	

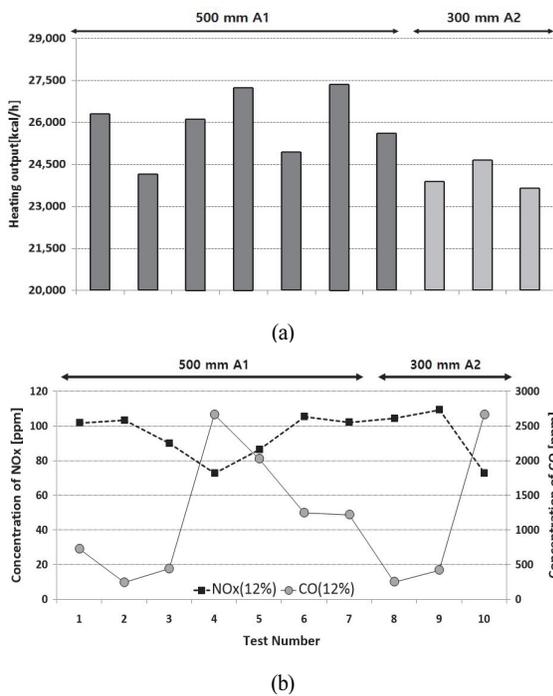


Fig. 4 Result of (a) heating output (b) concentration of major air pollutants by wood fuel grade

그러나 이러한 연료별 연소 특성 차이에도 불구하고, 일부 시험과정에서 발생한 CO 농도의 급격한 상승 구간을 제외하면 연료별 연소에 따른 차이는 크지 않았으며, 특히 국내 단체표준기준과 비교 시 매우 월등한 연소 특성이 나타났으며, 유럽의 EN303-5(Class 5급)의 CO농도 기준(700 mg/m³)과도 큰 차이를 보이지 않는 것으로 평가되었다. 이에 연료의 품질등급에 따른 보일러 성능의 차이는 크지 않은 것을 확인하였다. 연소 종료 후, 최종 발생하는 회분(Ash)함량은 전체 투입 연료 대비 0.63~1.25% 수준으로 나타났으며, 이는 연료가 함유하고 있는 고유의 회분함량(1.3 wt%) 대비 적은 비율로 보일러 내부에서 완전한 연소와 열분해가 되었음을 의미한다.

3.3 난방성능(출력/효율) 및 환경성 평가

3.3.1 난방성능 평가

30 kW급 화목보일러에 대한 난방출력과 효율에 대한 성능시험을 수행하였다. 먼저 난방출력량 분석결과, 2시간 동안 연소했을 때, 순환수량의 측정값(3,920 L)에 물의 비중량(약 977.7 kg/m³)을 환산하여 최종 순환수량은 0.532 kg/s였으며, 난방출수구의 평균온도 측정값(72.1°C), 난방 환수구 평균온도 측정값(57.5°C)을 활용해 물의 비열을 환산한 결과 약 4,174 J/kg°C로 평가되었다. 위 결과값을 바탕으로 난방출력(W)을 계산한 결과, 32.3 kW의 난방출력성능을 보이는 것으로 평가되었다. 또한 난방효율(%)에 대한 분석결과, 2시간 동안 사용된 연료량(19.9 kg), 시간당 연료소모량(0.0028 kg/s), 목재연료 발열량 수치로 계산된 연료 진발열량(NCV : 13,280 kJ/kg)으로 열입력량(Q_B)을 계산한 결과 36.8 kW로 나타났다. 최종 난방출력량에 대한 백분율로 계산한 결과, 30 kW급 화목보일러의 난방효율 87.9%로 평가되었다.

3.3.2 종합 환경성평가

종합 환경성평가는 2차 시제품을 대상으로 A2등급의 조갬목을 연료로 사용하였으며, 열교환장치 사용 및 난방수가 배출되는 것을 기본 조건으로 설정하였다. 또한 공기덤퍼 조건은 1차 공기덤퍼 50%, 2차공기덤퍼 100%, 최종 후단 덤퍼 50% 열림 조건에서 시험을 진행하였다. 입자상 오염물질(PM₁₀, PM_{2.5})농도분석은 증량법 측정, 광산란방식 미세먼지 측정기(Grimm 11-D, Germany)를 사용해 미세먼지 입자분포 분석을 동시에 수행하였다. 가스상 오염물질은 총 2회 연소배가스 측정장비(MK 9000)로 배가스 출구 500 mm 지점에서 연속적으로 실시간 측정하였으며, Table 4에 측정장치의 사양을 나타내었으며, 평균농도 분포 결과는 Table 5에 나타내었다.

Table 4 Specification of testing device

Classification	Particle	Gas
Model	Grimm 11-D(Germany)	MK 9000(Germany)
Pollutants	PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM ₁ , TSP	O ₂ , CO, CO ₂ , NO, NO ₂ , NOx
Range and resolution	0.253-35.13 μm 0-100 mg/m ³	O ₂ : 0~25%(0.01%) CO : 0-20,000 ppm (1 ppm) NO : 0-5,000 ppm (0.1 ppm) NO ₂ : 0-1,000 ppm (0.1 ppm) NOx : 0-6,000 ppm (0.1 ppm)
Time resolution	6s	10s
Sensor	Light scattering	CO : NDIR (Non-Dispersive Infrared) O ₂ : EC(ElectroChemical) NO/NO ₂ /NOx : CLD (Chemiluminescence Detection)

Table 5 Result of average concentration for air pollutants by O₂ standard concentration

Air Pollutants	1 st Average concentration					
	Raw	12% O ₂	Raw	10% O ₂	12% O ₂	13% O ₂
	ppm		mg/Sm ³			
CO	418.0	359.0	522.5	548.5	448.8	398.9
NO	101.1	86.9	135.5	142.2	116.3	103.4
NO ₂	1.0	0.9	2.1	2.2	1.8	1.6
NOx	102.2	87.8	137.6	144.4	118.2	105.0
O ₂ (%)	10.52					

Air Pollutants	2 nd Average concentration					
	Raw	12% O ₂	Raw	10% O ₂	12% O ₂	13% O ₂
	ppm		mg/Sm ³			
CO	459.6	359.9	574.5	549.9	449.9	399.9
NO	110.6	86.6	148.1	141.7	116.0	103.1
NO ₂	1.1	0.9	2.3	2.2	1.8	1.6
NOx	111.7	87.5	150.4	144.0	117.8	104.7
O ₂ (%)	9.51					

Air Pollutants	Average concentration for absorption methods				
	Raw	O ₂	10% O ₂	12% O ₂	13% O ₂
	mg/Sm ³				
PM ₁₀	33.8	10.1	28.0	27.8	24.7
PM _{2.5}	32.9	9.29	34.0	25.3	22.5

대기오염물질 환경성 평가결과, 가스상 오염물질은 국내 표준규격^[3] 기준에 비해서는 월등히 낮은 결과를 보였으며, 1차 시제품의 연소시험 결과와 비교 시 CO농도는 크게 낮아졌으며, NOx농도는 유사한 수준으로 배출되는 것을 확인하

였다. 각 오염물질 별 농도분포를 살펴보면, 먼저 CO 평균농도는 418.0~459.6 ppm(359.0~359.9 ppm, 12% O₂기준)으로, 1차시제품 시험결과(249.4~2671.4 ppm)에 비해 안정적인 연소결과를 보이는 것으로 나타났다. 이는 공기비 탬퍼 조절 및 고온연소공기의 2차 공급을 위해 연소실 내부 벽면에 전열 덕트를 설계하여 연소실 측면에 배치·설치함으로써 연소공기가 덕트 1개당 직경 10 mm의 hole을 통해 연소실 내부로 공급되는 구조개선에 의한 결과로 판단된다. 또한 공기 유동을 방해하지 않으면서 적절한 공기비 범위(배가스 O₂ 농도 7~12%)에서의 공기 공급량을 조절하여 최적의 연소조건을 통해 불완전 연소를 최소화한 결과로 사료된다.

1차와 2차 분석 결과를 평균한 NO농도는 101.1~110.6 ppm(86.6~86.9 ppm, 12% O₂기준), NO₂농도는 1.0~1.1 ppm(0.9 ppm, 12% O₂기준), NOx농도는 102.2~111.7 ppm(87.5~87.8 ppm, 12% O₂기준), O₂농도는 9.51~10.52%로 분석되었다. 미세먼지 중 PM₁₀은 33.8 mg/Sm³, PM_{2.5}는 32.9 mg/Sm³로 수준으로 배출되는 것으로 평가되었다.

미세먼지의 실시간 측정결과를 분석한 결과(Fig. 5), 연소시간 초반 높은 농도의 미세먼지 배출되는 것이 확인되었고

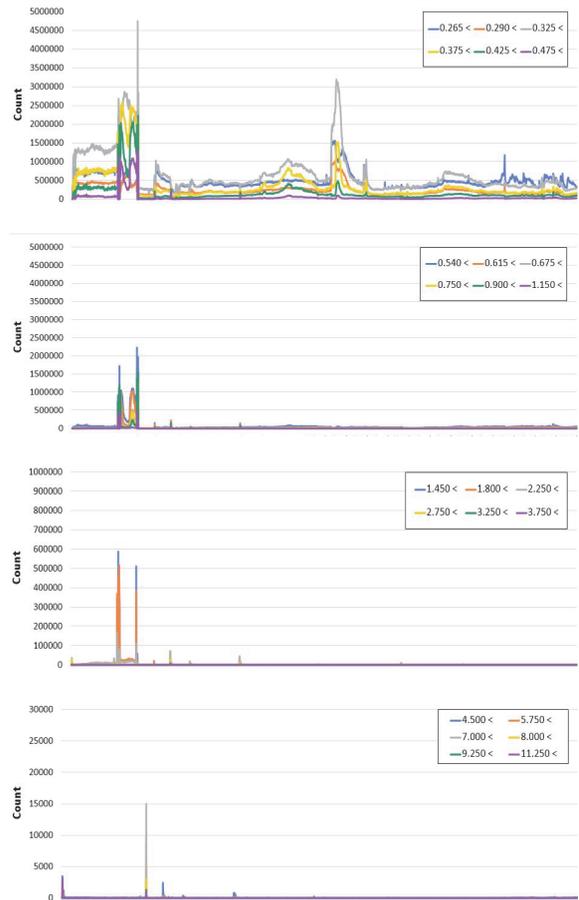


Fig. 5 Result of particle counter during measurement time

대부분의 입자크기 분포는 0.5 μm 이하 크기의 미세먼지 배출량 비율이 월등히 높은 것으로 나타났다. 0.5 μm 이하 미세먼지 입도 기여율은 0.265~0.375 μm 크기입자가 전체 입자크기 대비 기여율이 가장 높았고, 0.265 μm 이하 > 0.376~0.435 μm > 0.475 μm 순으로 분석되었다. 또한 입자 크기가 클수록 미세먼지 기여율은 매우 낮았으며, 세부적으로 분석해보면 입자크기 별 기여율은 1.2 μm 이하 > 3.75 μm 이하 > 10 μm 이하 순으로 평가되었다.

종합적으로 미세먼지의 입자크기 분포를 분석한 결과, 화목보일러의 연소 시 발생하는 미세먼지 입도는 매우 작은 초미세먼지(PM₁)가 대부분이며, 입자 크기 2.5 μm 이상 미세먼지는 매우 낮은 함량을 보이는 것으로 평가되었다. 이러한 배출 특성을 보았을 때, 고령층이 거주하는 농촌 지역 등에서 대부분 사용되고 있는 화목보일러 특성상 연소 시 발생하는 미세먼지 배출에 의한 인체 흡입 등으로 인해 건강 위해성은 더 클 것으로 판단되며, 화목보일러의 무분별한 판매와 사용을 규정하거나, 대기환경 배출기준 등에 관한 기준 마련이 반드시 이루어져야 할 것으로 판단된다.

3.4 환경인증기준안 설계

3.4.1 국내외 관련 표준 및 품질기준 비교분석

국내 단체표준은 “화목(장작), 브리켓” 등의 목재연료를 사용하는 표시 난방 출력력이 70 kW 이하 옥외에 설치하는 일반 가정용으로 난방수 온도 90℃ 이하, 온수 온도 65℃ 이하를 공급하는 화목보일러에 대하여 규정한 표준이다^[16]. 주요 성능 기준으로는 난방/온수 출력, 배출가스 온도, 가스상 대기오염물질(CO, NO_x, OGC, 10% O₂기준), 입자상 대기오염물질(분진, 10% O₂기준), 안전장치 시험, 구조시험, 전기 안전성시험 등으로 구성되어 있다.

시험에 사용된 연료는 화목(장작), 브리켓을 각각 수분 25%, 12% 이하, 재 1%, 0.5% 이하, 총발열량 10 MJ/kg 이상으로 규정하고 있으나, 그 범위가 너무 모호하고 광범위하여 표준기준으로 큰 의미가 없다. 이에 화목연료에 대한 정의가 필요하며 최근(2022년 5월)에 ISO 17225-5 바이오고형연료의 국제표준문서^[19]를 부합화한 국내 표준규격인 KS M ISO 17225-5 고품 바이오연료(장작)에 대한 표준규격^[20]이 제정되었으며, 장작 연료의 범위는 난로, 벽난로, 중앙난방 시스템과 같은 가정용 목재연소 장치에 사용하는 연료로 규정하고 있다^[20]. 특히 목재 난방장치는 연소 시 연료 품질 기준에 따라 환경오염 수준과 연소효율에 큰 차이를 보일 수 있다는 점을 감안하면 장작에 대한 연료 표준규격이 제정됨으로서 무분별한 연료 사용에 대한 최소한의 기준이 만들어진 것으로 판단하고 있다.

연료의 세부 등급은 3등급(A1, A2, B)로 각각 나누었고 A1, A2연료는 난로와 벽난로용으로 사용하는 것으로 규정하

였으며, 특히 A1은 통나무 및 화학적으로 처리하지 않은 목재 가공 산업의 부산물 및 잔류물로, A2는 뿌리를 제외한 전목, 통나무, 벌목 잔류물로 구분하였다. B연료는 화목보일러에 적합한 연료로 구분하였으며, 이 밖에도 연료 치수(지름, 길이, 함수율(10~20%, 10~25%, 10~35%), 에너지밀도(MJ/m³ 또는 kWh/m³), 순발열량(MJ/kg 또는 kWh/kg) 등을 표준에서 규정하고 있다^[23]. 다만 기존 ISO 국제표준을 부합화한 문서로 국내 장작을 대상으로 한 분석데이터의 한계로 인해 국내 실정에 맞는 표준화가 되었다고는 판단하기 어렵기 때문에 추후 많은 연구결과가 반영된 재개정이 필요할 것으로 사료된다.

한편, 바이오연료 등을 사용하는 난방기의 국제규격인 EN303-5는 난방출력 500 kW 이하급 수동 및 자동으로 연료를 공급하는 고체연료용 난방보일러를 규정하는 표준문서로 2012년에 제정되었다^[8]. 보일러의 구조(설계 포함), 안전(연료 과공급, 온도상승, 연소가스 누출, 온도제어 등), 성능(보일러 효율, 배가스온도, 연소시간, 난방출력, 배출가스 기준), 시험방법(시험조건, 측정방법, 출력시험, 환경시험)에 대한 모든 것이 표준화되어 있으며, 유럽의 모든 국가에서는 위 표준문서를 기본으로 따르고 있다.

EN303-5 표준에 따르면 바이오연료를 사용하는 기기의 연소 배기가스 배출기준은 수동 50kW 이하 용량에서 최고 품질 등급(Class 5)의 경우 CO 700 mg/m³, OGC(Organic Gaseous Carbon) 30 mg/m³, 먼지(TPM, Total Particulate Matter) 60 mg/m³ 이하이며, 유럽 TOP 25% 제품의 35~40 kW급 화목보일러 성능기준은 난방효율 83%, 먼지 152 mg/m³, CO 543 mg/kg_{fuel}, NO_x 115 mg/m³이며, 화목난로의 경우 난방효율 73%, 먼지 1069 mg/m³, CO 408 mg/kg_{fuel}, NO_x 126 mg/m³ 수준이다. 특히 성능기준에 맞춰 연구개발을 꾸준히 이루어낸 오스트리아는 1980년 이후 목재난방기의 효율이 55%에서 90%까지 증가하였고, CO 배출량은 20,000 mg/m³에서 50 mg/m³ 수준으로 감소하였다. 또한 유럽은 바이오연료를 사용하는 다양한 형태의 보일러(펠릿, 브리켓, 고품연료, 목재장작 등)에 대한 규격화된 표준화 뿐만아니라 품질이 더 우수한 제품에 대한 별도의 인증규격도 확립되어 있다. 종합적으로 유럽 각 국가(독일, 북유럽 5개국, 덴마크, 오스트리아, EU 등)들은 목재를 연료로 사용하는 다양한 보일러의 모든 제품 품질규격을 확보하고 있으며, 이를 통해 화목보일러에 대한 성능향상을 이룬 것으로 조사되었다^[11-15].

앞서 분석한 가스상 오염물질과 입자상오염물질 연소시험의 평균농도를 표준산소농도로 변환하여, 유럽 각국의 인증 기준 농도와 비교분석 한 결과를 Fig. 6에 정리하여 나타내었다. Nordic swan과 EN303-5에는 NO_x 기준이 없고 국가별 표준산소농도 기준이 다르기 때문에, 직접적인 비교는 일부 제한적이다. 먼저 CO와 NO_x는 주요 유럽 국가의 모든 기

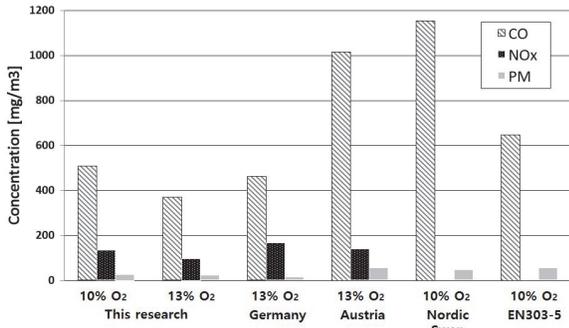


Fig. 6 Result of comparison of national standards and measurement data in this study(PM in this research is under 10 μm)

준을 충족하는 농도를 보였고, 먼지는 독일 Blue Angel 환경규격 기준인 15 mg/m³(O₂ 13%)에는 미치지 못하였으나 다른 국가의 인증기준 50~60 mg/m³(O₂ 10~13%)에는 만족하는 것으로 평가되었다. 이러한 비교결과를 종합적으로 고려하여, 국내 화목보일러의 환경인증기준을 설계·검토하고자 한다.

3.4.2 화목보일러 환경인증기준 개발

국내의 규격에 대한 조사결과 및 30 kW급 화목보일러 시험 결과, 그리고 국내 화목보일러 시장 상황을 종합적으로 판단하여 환경인증기준을 설정하였으며, 그 결과를 국내외 기준과 비교하여 Table 6에 나타내었다. 기준값은 국내 단체 표준^[16,17] 기준이 매우 광범위하고 낮게 설정되어 있어 그보다는 강화된 기준을 요구하도록 설정하였고 EN303-5에서 요구하는 기준항목과 일부 유사하도록 제시하였다. 특히 보일러 연소효율에 있어 가장 중요한 환경인자인 CO 농도는 600 mg/m³ 이하로 EN303-5의 Class 5와 비교 시 더 높게 설정하였고, 더 엄격한 기준을 요구하고 있는 독일의 Blue Angel, EU, 북유럽 5개국 Nordic swan 기준보다는 다소 낮게 설정하였다.

또한 NOx는 연료 자체가 함유하고 있는 성상(N) 비율에 따라 그 배출특성이 차이를 보이기 때문에 기준을 잡는 것이 매우 어렵다. 다만, 본 연구에서는 앞선 분석결과를 참고하여 전 유럽 국가에서 요구하는 수준과 유사한 150 mg/m³ 수준으로 설정하였으며, 먼지의 경우, EN303-5와 같은 60 mg/m³로 설정하였다. 난방효율 성능기준은 기존 연구^[21] 결과와 국내 화목보일러의 기술개발 단계를 고려하여 최소 75%에서 최대 85% 수준으로 설정하였고 이는 유럽 기준^[22,23]과 비교 시, 유사 또는 다소 낮은 기준이다. 단, 나라별 표준산소농도에 대한 보정치에 대한 근거 규정이 명확하지 않고 화목보일러를 사용하는 특징(보일러 용량, 수동 및 자동, 연료 종류, 사용방법 등)이 차이가 있는 관계로 직접적인 농도의 비교평가는 어렵다는 점은 고려되어야 한다.

Table 6 Standardization of wood boiler at each country

Contents	CO	OGC	NOx	PM	Eff. (%)	Note	
	mg/m ³						
Germany	Wood Stove	500	70	180	15	-	13% O ₂
Blue Angel	Wood pellet boiler	80	5	150	20	-	-
EU	Environment certification	250	7	150	20	over 79	-
	Eco design certification	500	30	200	20	-	-
Austria	Eco-label	375	45	180	45	79-89	-
	General	1100	80	150	60	-	13% O ₂
Nordic Swan	Bio solid fuel boiler	350	15	200	40	-	10% O ₂
Nordic Swan Ecolabel	Wood Stove	1250	100	-	50	-	-
Swiss		800	-	-	50	-	13% O ₂
Croatia		1000	-	-	-	-	11% O ₂
Denmark		700	30	-	60	-	10% O ₂
EN303-5 (Manual boiler)		700	30	-	60	-	10% O ₂
Korea	SPS-KEAA 23-7211	18750	150	300	150	-	10% O ₂
	This research standard	600	-	150	60	75-85	12% O ₂

최종적으로 시험분석자료를 바탕으로 국내외 화목보일러의 유사 인증제도 및 기준값 비교를 통해 국내 실정에 맞는 화목보일러 환경인증기준을 설정하였다. 특히 향후 2023년 4월부터 환경부에서 시행 예정인 「대기관리권역법 대기환경 개선에 관한 특별법 및 시행령 제34조(소규모 배출원 규제)」의 목재를 연료로 하는 난방기기의 인증 신청 및 절차·방법 등에 관한 고시 등의 제정에 필요한 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 다만 본 연구에서 도출된 결과는 환경부 고시에서 규정할 예정인 특별법 기준에 비해서 환경성이 더 우수한 친환경 화목보일러 제품에 적용하는 것이 타당하다. 또한 이번 연구에서 도출된 기준이 국내에서 생산·판매되고 있는 모든 화목보일러의 성능을 대표하는 것은 아니며, 본 연구진에서 개발한 화목보일러를 대상으로 한 평가결과 및 선진국에서 판매되고 있는 친환경 화목보일러 수준의 기술력이 확보된 제품 수준을 충족하는 보일러에 적용할 수 있다는 것이다.

따라서 향후 다양한 화목연료에 대한 품질시험 데이터 확보와 국내 시장에서 판매되고 있는 다른 유사 보일러 제품을 대상으로 한 비교시험이 필요하며, 이를 통해 시험결과의 재현성을 확보하고 이후 인증기준에 대한 면밀한 검토가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 30 kW급 화목보일러 개발을 위해 연료별 연소성능 시험을 통해 최적화를 진행하였고, 다양한 조건에서 보일러의 성능을 평가하였다. 또한 국내외 화목보일러 대상 관련 표준규격 조사를 통해 국내실정에 맞는 환경인증기준(안)을 설계·검토한 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 화목보일러 연소특성 분석결과, 1차 공기댐퍼의 50% 이상 조절과 2차 공기의 열분해 최적화 조절이 필요하며, 1차 및 2차 공기비의 단계 조절을 통해 설계가 필요하며, 이를 개선한 보일러를 설계하였다.
- 2) 1차 시제품을 대상으로 연료 등급별 연소 특성을 10회에 걸쳐 분석한 결과, 전체적으로 연소효율이 높았고, CO 농도의 일부 값을 제외하면 EN303-5와 큰 차이를 보이지 않았으며, 연료 품질 등급에 따른 성능의 차이도 크지 않은 것을 확인하였다.
- 3) 난방성능을 평가한 결과, 난방출력은 32.3 kW, 난방효율은 87.9%로 평가되었으며, 일부 설계와 연소구조를 개선한 2차 시제품의 환경성을 종합적으로 평가한 결과, CO농도가 매우 안정적인 것을 확인하였으며, 미세먼지는 0.5 μm 이하 크기의 초미세먼지가 그 배출량 기여율이 가장 높은 것으로 평가되어 화목보일러 사용에 따른 배출기준 및 관련 제도화가 시급히 이루어져야 할 것으로 판단되었다.
- 4) 국내외 표준규격 조사와 1~2차 시제품에 대한 성능시험을 통해 국내 화목보일러에 대한 환경인증기준(안)을 설계한 결과, CO 농도는 600 mg/m^3 이하, NOx농도는 150 mg/m^3 이하, 먼지는 60 mg/m^3 이하가 적합한 것으로 설계되었다. 다만 본 연구에서 개발된 기준은 기존제품 대비 환경성이 우수한 제품에 적용하는 것이 타당하며, 현재 국내에서 생산·판매되고 있는 모든 화목보일러의 성능을 대표하는 것은 아니다.
- 5) 다양한 목재연료에 대한 품질시험과 국내 다른 화목보일러 제품을 대상으로 한 비교 성능시험이 이루어진다면 더 객관성이 검증된 환경인증기준이 도출될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 “미세먼지 사각지대 해소 및 관리실증화 기술개발사업”의 지원을 받아 연구되었습니다(RE20204127).

References

- (1) Euh, S. H., Oh, W. C., Oh, J. H., and Kim, D. H., 2014,

“The Formation Characteristics of Tar, Ash and Clinker due to Combustion of Wood Pellet and Performance Analysis of Wood Pellet Boiler in terms of the Moisture Contents Change of the Wood Pellet,” Journal of Energy Engineering, Vol. 23, No. 3, pp. 211~220.

- (2) Kim, J. H., Heo, S. H., Kim, H. C., Jo, M. R., Lim, S. O., Lee, S. B., and Kang, D. I., 2017, “A Study on Emission Characteristics of Air Pollutants from the use of Solid Fuel,” Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, Vol. 33, No. 2, pp. 77~86.
- (3) Kaung, M.W., Tomas, P., and Chris, B. B., 2012, “Particles and gaseous emissions from realistic operation of residential wood pellet heating systems, Atmospheric Environment,” Vol. 59, pp. 320~327.
- (4) KS B 8901, 2020, Wood pellet boilers.
- (5) Moon, J. H., Lee, U. D., Ryu, C. K., Lee, Y. M., Bae, and W. K., 2011, “Characteristics of Tar Generation during the interval of Gasification of Woodchip,” The Korean Society of Combustion, Vol. 16, No. 1, pp. 8~14.
- (6) Robrto C., Joan, S., Xavier, F., and Daniel, M., 2001, “Steam Reforming Model Compounds of Biomass Gasification : Conversion at Different Operating Conditions and Tendency towards Coke Formation,” Fuel Processing Technology, Vol. 74, pp. 19~31.
- (7) Park, S. K., Lyu, K. J., Kim, D. K., Kim, D. Y., Jang, Y. K., and Jeon, E. C., 2015, “Emission Characteristics of Air Pollutants and Black Carbon from Wood-pellet Stove and Boiler,” Journal of Climate Change Research, Vol. 6, No. 1, pp. 41~47.
- (8) EN 303-5, 2012, Heating boilers – Part 5: Heating boilers for solid fuels, hand and automatically fired, nominal heat output of up to 300 kW – Terminology, requirements, testing and marking.
- (9) EN 303-6, 2019, Heating boilers — Part 6: Heating boilers with forced draught burners — Specific requirements for the domestic hot water operation of combination boilers with atomizing oil burners of nominal heat input not exceeding 70 kW.
- (10) EN 304, 2017, Heating boilers – Test code for heating boilers for atomizing oil burners.
- (11) Blue anger, The German Ecolabel, 2020, Stove for wood(DE-UZ 212) Basic Award criteria version 6.
- (12) Blue anger, The German Ecolabel, 2016, Wood Pellet Stove(DE-UZ 111) Basic Award criteria version 2.
- (13) Nordic Ecolabeling, 2021, Boilers for solid biofuel ver 3.2.
- (14) EU Regulation, 2015, Energy labelling regulation for solid fuel boilers, 1187.
- (15) EU Regulation, 2015, Ecodesign regulation for solid fuel boilers, 1189.
- (16) SPS-KEAA 23-7211, 2017, Firewood boiler.
- (17) SPS-B KEAA 0034-7275, 2019, Non-woody pellet boilers.

미세먼지 저감을 위한 30kW급 친환경 화목보일러의 성능평가 및 환경인증기준 설계

- (18) Standard methods for the examination of air pollution in Korea, 2022, Korea. Development of safety standards of firewood boilers for households under 70 kW.
- (19) ISO 17225-5, 2021, Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 5 : Graded firewood. (22) EU Regulation, 2015, Energy labelling regulation for solid fuel boilers, 1187.
- (20) KS M ISO 17225-5, 2022, Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 5 : Graded firewood. (23) EU Regulation, 2015, Ecodesign regulation for solid fuel boilers, 1189.
- (21) Korea Energy Appliances Industry Association, 2017,