



첨가제 펠릿을 이용한 목재 펠릿보일러의 타르 감소와 열효율 분석

주상연¹⁾ · 이충건²⁾ · 정인선³⁾ · 박선용²⁾ · 오광철⁴⁾ · 조라훈²⁾ · 이상열⁵⁾ · 김민준³⁾ · 김석준³⁾ · 김대현⁶⁾*

Tar Reduction and Thermal Efficiency Analysis of a Wood Pellet Boiler Using Catalyst Mixed Pellets

Sang Yeon Joo¹⁾ · Chung Geon Lee²⁾ · In Seon Jeong³⁾ · Sun Yong Park²⁾ · Kwag Cheol Oh⁴⁾ ·
La Hoon Cho²⁾ · Sang Yeol Lee⁵⁾ · Min Jun Kim³⁾ · Seok Jun Kim³⁾ · Dae Hyun Kim⁶⁾*

Received 21 August 2018 Revised 26 April 2019 Accepted 2 May 2019

ABSTRACT Wood pellets are ‘carbon natural’ fuels that contribute to greenhouse gas reduction regulation. On the other hand, the tar, generated from woody biomass combustion, condenses and accumulates in the combustion chamber resulting in a reduction of heat transfer on the surface where heat exchange takes place, which decreases the thermal efficiency and equipment life span. To solve these problems, an additive acting as a catalyst for a reforming reaction was mixed with the pellets to reduce tar formation in combustion. For the experiment, 2% of dolomite, 2% of limestone and 1% mixture of dolomite and limestone were added as catalysts to the wood pellets. The experiments were conducted in the same external environment and a comparison of the thermal efficiency and reduction of tar of boiler containing the solid additive was carried out. As a result, the thermal efficiency of the additive pellets was increased by 1.09% and 0.36% for dolomite 2%, limestone 1% and dolomite 1%, respectively, compared to conventional wood pellets, and decreased by 0.46 for 2% lime stone. Although the thermal efficiency of the dolomite 2% additive pellets was the highest, pellets with 1% dolomite and 1% limestone produced the best result.

Key words Wood pellet boiler(목재펠릿 보일러), Wood pellet(목재펠릿), Dolomite(백운석), Lime(석회석), Mixed pellet(혼합펠릿), Tar(타르)

- 1) Master, Cheorwon Plasma Research Institute
- 2) Doctoral Student, Department of Biosystems Engineering, College of Agriculture and Life Sciences, Kangwon National University
- 3) Master’s Degree Student, Department of Biosystems Engineering, College of Agriculture and Life Sciences, Kangwon National University
- 4) Postdoctoral Researcher, Green Materials & Processes R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology
- 5) Master, Samwon E&B Co., Ltd.
- 6) Professor, Department of Biosystems Engineering, College of Agriculture and Life Sciences, Kangwon National University

*Corresponding author: daekim@kangwon.ac.kr
Tel: +82-33-250-6490 Fax: +82-33-259-5560

Nomenclature

- η_t : Thermal efficiency, %
 Q_o : Total heat output, W
 Q_i : Total heat input, W
 H_t : Low calorific value, kcal/kg
 G_p : Fuel consumption, kg/h
 C_{p-w} : Specific heat of water, kcal/kg · K
 T_{w-i} : Inlet temperature, K
 T_{w-o} : outlet temperature, K

1. 서론

현재 세계적으로 지구 온난화에 따른 이상기후와 화석연료 사용증가에 따른 환경오염 문제가 심각해지면서 화석에너지를 대체 할 수 있는 신재생 에너지에 관심이 증대되고 있다. 현재 우리나라는 에너지수요량의 대부분을 수입이 크게 차지하고 있으며, 수입의존도가 2017년 기준 94.7%를 나타내고 있다^[1]. 이 규모는 전체 에너지수입액의 약 23.4%^[2]에 해당하며, 이를 해결하고자 국내 자체적으로 공급·수요가 가능한 에너지 개발이 시급하다. 목질계 바이오매스 에너지는 기상여건과 상관없이 화석연료와 동일한 방식으로 이용가능하며, 화석연료 고갈과 온실가스 문제에 대응할 수 있는 재생에너지원으로써 각광받고 있다. 연소 시 발생하는 이산화탄소량은 경유의 8.33%수준이고, 이 또한 새로운 바이오매스 생산에 사용되어 ‘탄소중립(Carbon Neutral)’ 연료로 인정받고 있다. 목재펠릿의 소비량은 2009년 18.22 ton에서 2014년 1,940,103ton으로 약 106배 증가되어 수입에 크게 의존하고 있다^[3]. 매년 벌채되는 전체 임목재적 중 54%는 가시나 낙엽 등의 벌채부산물로서, 에너지밀도가 낮은 저급바이오매스로 미 사용되어 버려지고 있다^[4]. 이를 이용해 제작된 펠릿의 경우 연소 시 클링커(Clinker) 및 재(Ash)가 많이 발생하여 가정용 소형 연소시스템에 사용하기 어려우며, 낮은 발열량과 타르 발생에 따른 열효율 감소, 비용 증대 등에 따른 경제적 손실이 발생한다^[5]. 위와 같은 문제의 해결을 통한 저급바이오매스의 활용 및 이용 증대가 필요한 실정이다. 이에 대한 방안 중, 목재펠릿 제조 시 첨가제를 혼합하여 제조한 첨가제 펠릿에 대한 연구가 현재 활발히 진행 중이다. Myrén, C *et al.*^[6]은 열분해 시 백운석의 타르 저감효과를 확인하기 위하여 타르성분 중 백운석이 촉매제로 작용할 때 가장 분해가 어려운 나프탈렌을 대상으로 실험을 하였고 실험 후 타르성분의 감소량을 확인하였다. Devi, L *et al.*^[7]은 백운석과 감람석을 이용하여 타르의 저감이 이뤄지는지에 대해 규명하였다. Sagar Kafle *et al.*^[8]은 첨가제를 이용한 펠릿의 보일러 실험을 통하여 연소실 내 오염면적의 감소효과를 확인하였다.

본 연구에서는 고품 촉매제인 백운석(Dolomite, CaMg(CO₃)₂)과 석회석(Limestone, CaCO₃)을 촉매제로 이용하

여 가스화 연소 시 건조개질과 증기개질 반응을 촉진시켜 상위 단계의 타르가 하위 단계의 타르로 분해되어 최종적으로 생성되는 침전물, 슬래그 등을 감소시켜 타르의 생성을 억제하도록 하였다. 이와 같이 바이오매스가 가스화 될 때 생성되는 타르 양을 감소시켜 저급 바이오매스 고품연료의 활용도를 높이기 위한 연구를 진행하였다.

2. 재료 및 방법

본 연구에서는 고품촉매제를 첨가한 첨가제목재펠릿을 사용하여 동일한 외부 환경에서 실험을 진행해 각각의 열효율과 발생한 타르의 양을 비교분석을 실시하였다.

2.1 실험장치 구성

2.1.1 목재펠릿보일러

본 연구에서는 난방열출력 약 23,000Kcal/h 급 소형 범위에 해당하는 가정용 목재펠릿보일러(K-23A (주) 규원테크, 대한민국, Fig. 1)를 이용하였으며, 주요 재원 Table 1과 같다.

목재펠릿 보일러(K-23A)의 연소실은 입형 연관식 구조로 연소 안정성을 고려하여 화격자는 도가니형, 연료공급 방식은 하향식으로 채택되었다. 연관 내에는 배플(Baffle)이 설치되어 연소가스의 유동을 통제하고 전열면 상 연소 생성물을 제거하는 기능을 한다. 고온의 연소가스는 배플을 포함한 연관(2nd pass, 3rd pass)을 통과하여 주위 난방수와 열 교환 후 3rd pass 상단 및 후면에 설치된 배풍기에 의해 배기가스의 형태로 배출된다. 난방수는 3rd pass 하

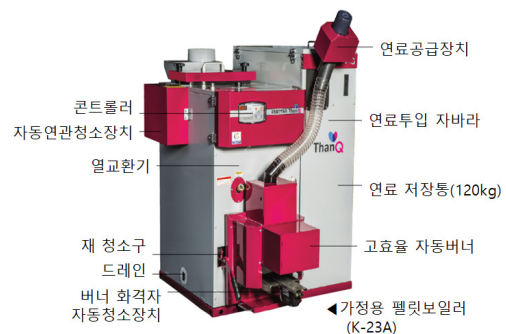


Fig. 1. Wood pellet boiler K-23A

Table 1. Specification of the pellet boiler

Divide		Contents				
Manufacturing company		KYUWONTECH Co. (Republic of Korea)				
Manufacturing date (Manufacturing No.)		2012, 02. 05 (KSP20A1202002)				
Type (Model, NO.)		Hot water boiler (K-23A)				
Purpose		Heating and hot water				
Heating type		2 circuit way				
		Combustion tube type				
Regular Heating Output	Heating	19.7 kW				
	Hot Water	19.7 kW				
Maximum working pressure	Heating	0.1 MPa				
	Hot Water	0.1 MPa				
Rated voltage		220 V				
Heat transfer area		3.1 m ²				
Capacity for irrigation		110 L				
Fuel supplying type		Drop to down				
Fuel supplying device		Screw				
Combustion type		Burner				
Reverse Flame anti device		Drop suit / Isolation damper				
Ash removal type		Manual				
Fan	Type	Power (kW)	Flow (m ³ /min)	Pressure (kPa)	Voltage (V)	
	Press	60	300	37	220	
Power consumption	Boiler	86 W				
	Burner	700 W				
Burner automatic cleaning device		Slide				
Heat transfer area automatic cleaning device		Spring				

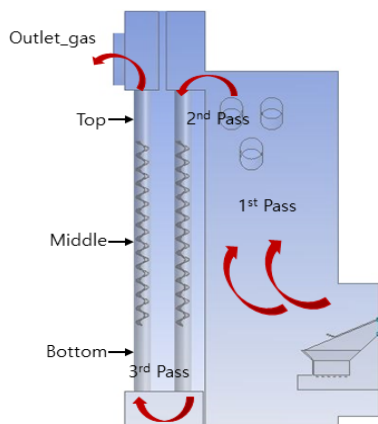


Fig. 2 .Flue gas flow and schematic of pellet boiler

단·후면에 설치된 펌프에 의해 배수되고, 목표지점에서 열 교환 후 연소실 상단으로 환수되는 구조를 가진다(Fig. 2).

2.1.2 출력시험장치

목재펠릿보일러 성능시험 시 실제 운전 상태와 동일한 조건을 구현하기 위하여 출력 시험장치를 통해 부하를 적용 하였다. 보일러 내 난방수의 온도가 60°C에 도달되면 3rd pass 후면·하단에 설치된 펌프에 의해 유출되며, 100,000 kcal/h 이하 급 판형 열교환기에 유입 및 열 교환 발생 후 연소실의 상단으로 유입된다. 출력 시험장치는 열교환기의 각 입·출구와 난방·냉각수의 순환배관이 각각 연결되었으며, 난방수 및 냉각수의 입·출수의 온도를 측정하기 위해 K-type 열전대(thermocouple)가 설치되었으며, 개략도는 Fig. 3과 같다.

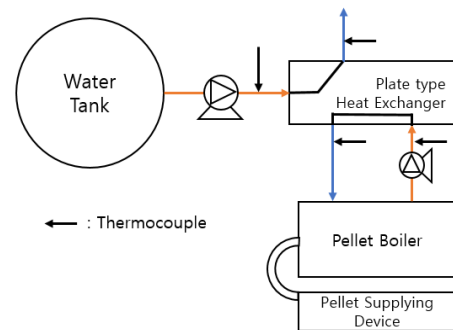


Fig. 3. Schematic of efficiency experiment device

2.2 첨가제 선정 및 타르 제거기작

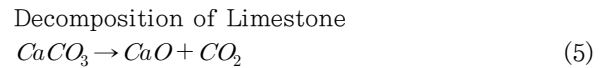
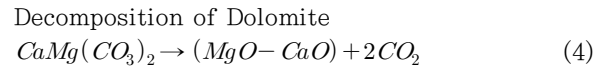
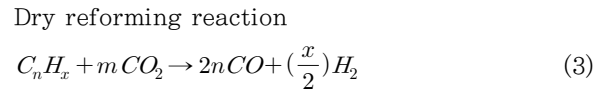
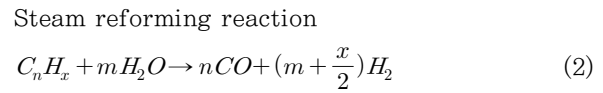
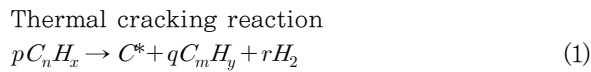
2.2.1 첨가제

바이오매스 가스화에서 타르 및 탄화수소를 합성가스로 변환시켜 효율향상을 시키는 저비용·일회용의 촉매제인 백운석 및 석회석을 선정하였다.

2.2.2 타르 제거 기작

바이오매스는 연소 시 목질계성분인 리그닌(20~30%)이 다수 포함되어 있기 때문에 가스화 반응 중 타르가 발생된다. 이때 생성된 고분자 화합물 타르는 기본적으로 열화학적 분해 반응(Thermal cracking reaction, 식 (1))을 통해 하위 단계인 저분자 화합물 타르와 고체탄소 및 수소

로 분해된다. 여기서 고체탄소 및 수소는 기상연소를 통하여 이산화탄소 및 수분으로 전환되며, 남은 저분자 화합물 타르는 수증기개질반응(Steam reforming reaction, 식 (2))과 건식개질반응(Dry reforming reaction, 식 (3))을 통해 수소와 일산화탄소로 전환되며 연소를 통해 제거 된다. 이때 건식개질반응에 관여하는 이산화탄소는 첨가제 분해(Decomposition of Dolomite and limestone, 식 (4), (5))를 통하여 생성되어 타르제거반응에 관여하며 이는 전체 가스화 반응의 효율을 증대시켜 최종적인 연소 특성이 개선된다^[9~11].



2.3 펠릿 생산

기타 첨가제의 양은 2% 이내로 제한한 Table 2의 목재

Table 2. Specifications and quality standards for wood pellet in Korea (KFRI, 2009)

Properties	Unit	Grade1	Grade2	Grade3	Grade4
Diameter	mm	6 ~ 8	6 ~ 8	6 ~ 8	6 ~ 8
Length	mm	≤32	≤32	≤32	≤32
Bulk Density	kg/m ³	≥640	≥600	≥550	≥500
Moisture content	%	≤10	≤10	≤10	≤10
Ash content	%	≤0.7	≤1.5	≤3.0	≤6.0
Fine component	%	<1.0	<1.0	<2.0	<2.0
Durability	%	≥97.5	≥97.5	≥95	≥95
Lower heating value	kcal/kg (MJ/kg)	≥4,300 (≥18.0)	≥4,300 (≥18.0)	≥4,040 (≥16.9)	≥4,040 (≥16.9)
Sulfuration	%	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Chlorine	%	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Nitrogen	%	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3
Other Additives	%	<2.0	<2.0	<2.0	<2.0

Table 3. Physical characteristic of produced pellets

Characteristics	Pellets	Experimental group		
	Control Yeosu Pellet	Dolomite 2% Pellet	Lime 2% Pellet	Dolomite 1% Lime 1% Pellet
Moisture contents (%)	9.0	7.8	13.9	12.1
Ash Contents (%)	0.4	1.8	3.5	2.9
Higher heating value (kcal kg ⁻¹)	4,782	4,730	4,850	4,730
Lower heating value (kcal kg ⁻¹)	4,404	4,360	4,444	4,334
Diameter (mm)	6	8	8	8
Length (mm)	16	23	23	25
Bulk Density (kg/m ³)	667	640	590	540
Durability (%)	98.9	90.6	97	95.1

펠릿 규격 및 품질기준에 따라 백운석 2%, 석회석 2%, 백운석 1% 및 석회석 1%로 제작되었으며 각각의 생산된 펠릿은 아래 Fig. 3과 같다. 기존 목재펠릿과 비교하여 첨가제 펠릿 모두 저위발열량이 기존의 1등급 펠릿 4,300kcal/kg 이상으로 나타났으며, 내구성의 경우 백운석 2% 첨가제 펠릿을 제외하고 모두 95%이상을 만족하였다. 하지만 첨가제 펠릿의 경우 백운석과 석회석 함량으로 인하여 애쉬가 증가되어 나타났으며 이는 첨가제가 반응 후 남아 있는 것으로 판단된다. 또한 첨가제 펠릿 성형 시 포함된 석회석과 백운석으로 인하여 최종적인 단위질량당 에너지량은 석회석 2%첨가 펠릿만 증가하였으나 첨가제의 촉매반응으로 인한 보일러의 연소효율은 다소 향상될 것으로 예상된다^[12].

2.4 실험방법

2.4.1 보일러 연소실험

기존 목재펠릿과 첨가제 펠릿에 따른 목재펠릿 보일러의 타르 축적량 및 열효율 비교·분석은 1회 100시간 총 2반복 실시하였으며, 단위 시간별 동일한 외부환경(산화제량, 부하, 주변온도, 펠릿소비량)에서 진행되었다.

2.4.2 타르 측정

보일러 연소실 화격자 상에서 목재펠릿 연소 시 축적되는 타르의 양을 측정하기 위하여 전열면과 동일한 탄소강(Carbon steel)재질의 철판 시험판을 제작하여 부착하였다. 구조물은 화격자 반대 편 전열면에 설치되었으며 타르 축적량은 전자저울(FX-30, A&D CO.Ltd Japan)을 이용하여 측정하였다^[13].

2.4.3 열효율

본 연구에 적용된 열적성능시험방법은 「신재생에너지 설비 심사 세부기준 - 목재펠릿온수 보일러」에 명시된 국가기술표준원(Korea Agency for Technology and Standards, KATS)의 기준으로 채택하였다. 정격부하(rated load)에서 정상상태 약 2시간 이상, 정격부하이상(over load)에서 정상상태 약 1.5시간 이상, 첨가제 혼합목재펠릿 이용 시험에서는 자체 제작된 연료의 약 0.5시간 이상을 기준으로 하였다. 연료 소비량 측정 허용오차는 ±1.5%, 온수유량의 측정

허용오차는 ±1.0%, 난방수의 온수온도측정 허용오차는 ±1.0℃로 하여 펠릿 별 열효율 변화를 측정하였다^[14,15].

보일러 열효율(η_t)은 유입된 총 열량(Q_i) 대비 유출된 총 열량(Q_o)의 비율로 식 (6)을 통해 산출 하였다.

$$\eta_t = \frac{Q_o}{Q_i} \times 100 (\%) \quad (6)$$

유입되는 총 열량(Q_i)은 연료의 저위발열량(H_i)과 연료의 소모량(fuel consumption, G_p)을 고려한 식 (7)로 표현된다.

$$Q_i = H_i \times G_p \quad (7)$$

유출되는 총 열량(Q_o)은 공급수의 질량유량(\dot{m}), 난방수의 비열(C_{p-w}), 난방수의 유입온도(T_{w-i}) 및 유출온도(T_{w-o})의 차이를 고려한 식 (8)로 표현된다.

$$Q_o = \dot{m} \times C_{p-w} \times (T_{w-o} - T_{w-i}) \quad (8)$$

3. 실험 결과

3.1 열효율 분석

본 실험에서는 정상상태에서의 열효율 현상에 대하여 분석하기 위한 실험을 실시하였고 온도 변화는 ±1℃ 이내로 측정되었다. 이때의 데이터를 정상상태로 판단하여 분석을 진행하였으며, 보일러 내부 환수 및 부하의 온도 변화는 다음과 같다(Fig. 4). 또한 연소실험 중 실험에 사용된 보일러 자체의 연소로 청소기능으로 인해 첨가제가 연소된 후 연소로 내에 누적되는 현상은 발생하지 않았다.

1차 실험 열효율 분석 결과 기존 목재펠릿의 경우 90.64%, 백운석 2% 첨가펠릿은 91.71%, 석회석 2% 첨가펠릿은 90.18%, 백운석 1% 및 석회석 1% 첨가펠릿은 91.02%로 백운석 2% 첨가펠릿이 기존 목재펠릿보다 1.09% 높은 것을 확인하였다. 2차 실험 열효율은 분석 결과 기존 목재펠릿의 경우 90.61%, 백운석 2% 첨가펠릿은 91.5%, 석회석

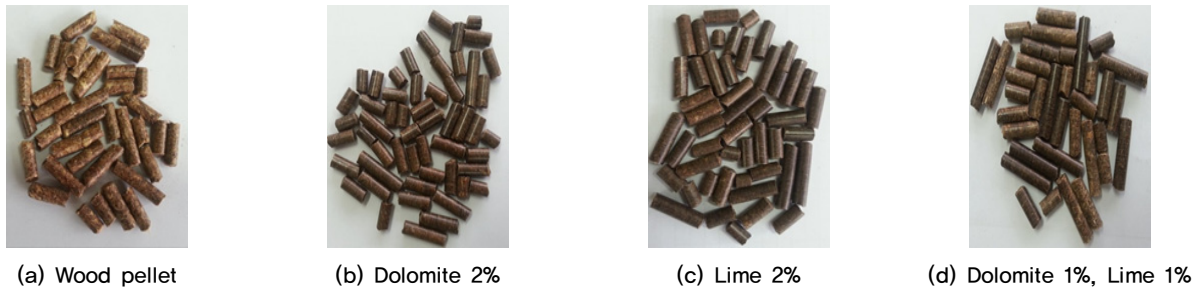


Fig. 4. Wood pellet and catalyst mixed pellets

Table 4. Thermal performance in terms of additives mixing condition

1st experiment					
Performance	Variable	Control	Experimental group		
		Non-additives	Dolomite 2%	Lime 2%	Dolomite 1% lime 1%
Inlet water (K)		317.53	310.27	317.59	316.83
Outlet water (K)		340.56	334.83	342.03	341.05
Temp, difference (K)		23.03	24.56	24.44	24.22
Thermal efficiency (%)		90.64	91.71	90.18	91.02
Absolute difference with control (%p)		-	1.09	-0.46	0.38
2nd experiment					
Inlet water (K)		314.60	313.73	318.06	315.85
Outlet water (K)		337.63	338.24	342.33	340.03
Temp, difference (K)		23.02	24.51	24.27	24.18
Thermal efficiency (%)		90.61	91.52	89.55	90.87
Absolute difference with control (%p)		-	0.91	-1.06	0.26

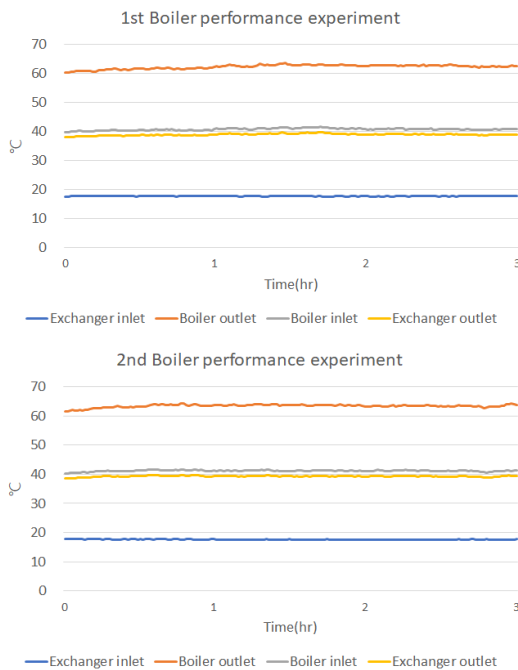


Fig. 5. Inlet and outlet water temperatures from the boiler in terms of time

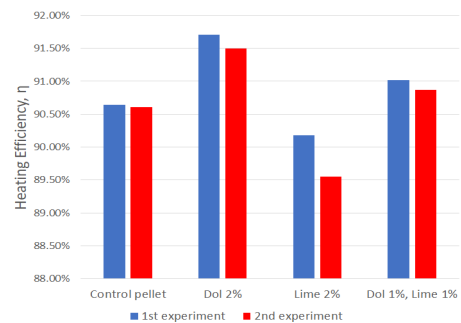


Fig. 6. The thermal efficiency of boiler measured on each sample pellet

2% 첨가펠릿은 89.55%, 백운석 1% 및 석회석 1% 첨가펠릿은 90.87%로 백운석 2% 첨가제펠릿이 기존 목재펠릿보다 0.91% 높은 것을 확인하였다(Table 4, Fig. 6).

3.2 타르 측정

1차 실험 타르 측정 결과 백운석 2% 첨가펠릿이 기존 목

Table 5. Tar measurement results

1st experiment					
Performance	Variable	Control	Experimental group		
		Non-additives	Dolomite 2%	Lime 2%	Dolomite 1% lime 1%
Weight (g/cm ³)		0.029	0.027	0.022	0.012
Weight. difference (g/cm ³)		-	0.002	0.007	0.017
Absolute difference with Control (%p)		-	6.9	24.1	58.4
2nd experiment					
Performance	Variable	Control	Experimental group		
		Non-additives	Dolomite 2%	Lime 2%	Dolomite 1% lime 1%
Weight (g/cm ³)		0.034	0.031	0.025	0.023
Weight. difference (g/cm ³)		-	0.003	0.009	0.011
Absolute difference with Control (%p)		-	8.8	26.4	32.3

재 펠릿 대비 0.002g/cm², 석회석 2% 첨가펠릿이 0.007 g/cm² 감소되었으며, 백운석 1% 및 석회석 1% 첨가펠릿이 0.017g/cm² 감소되어 3가지 첨가제 펠릿 중 가장 많은 양의 타르가 감소되었다. 2차 실험 타르 측정 결과 백운석 2% 첨가펠릿이 기존목재펠릿 대비 0.003g/cm², 석회석 2% 첨가펠릿이 0.009g/cm² 감소되었으며, 백운석 1% 및 석회석 1% 첨가펠릿이 0.011g/cm² 감소되어 3가지 첨가제 펠릿 중 가장 많은 양의 타르가 감소되었다(Table 4).

4. 결론

보일러의 효율적인 사용과 성능 유지를 위해 보일러 연소실 내 생성·축적되는 타르의 제거가 필요하다. 본 연구는 저급바이오매스에 타르 제거 효과가 있는 고품축매제 [백운석(Dolomite, CaMg(CO₃)₂), 석회석(Lime, CaCO₃)]를 첨가하여 펠릿을 제작해 실제 사용되고 있는 가정용 목재펠릿보일러로 연소실험을 실시하였다. 실험결과로 1차, 2차 실험의 Weight. difference(g/cm³) 값은 각각 0.017g/cm² 과 0.011g/cm²으로 백운석 1% 및 석회석 1% 첨가펠릿이 평균 0.014g/cm²로 목재펠릿 대비 가장 큰 타르감소량을 보였다. 1차, 2차 모두 백운석 2% 첨가펠릿의 열효율이 가장 높았으며, 평균 91.615%를 나타내었고 백운석을 첨가한 펠릿을 이용한 실험에서는 열효율이 상승하는 효과를 보였으나 석회석이 혼합되기 시작하면서 미미하나 효율감소를

보여 석회석은 큰 효과를 보여주지 못 하였다. 따라서 열효율과 타르감소량을 종합적으로 고려할 시 백운석 1% 및 석회석 1% 첨가펠릿이 가장 좋은 것으로 확인되었다.

그러나 첨가제가 혼합된 펠릿은 첨가제를 Ash함량을 증가시키는 추가적인 Ash로 고려하면 펠릿의 등급이 낮아지거나 목재펠릿규격^[9]에 의한 기타첨가물로 고려한다면 등급을 상승시키거나 하락은 되지 않을 것으로 판단된다. 따라서 현재 버려지고 있는 저급바이오매스에 고품축매제 첨가하여 펠릿 제작 시 국내 목재펠릿 공급부족 현상을 해소할 수 있을 것이라 판단된다. 또한 추후 이에 따른 경제성 분석이나 첨가제의 균일한 혼합율에 관한 연구가 수행된다면 보다 향상된 품질의 바이오매스 고품연료생산에 도움이 될 것으로 사료된다.

감사의 글

본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림수산식품기술기획평가원의 농림축산식품연구센터지원사업의 지원을 받아 연구되었음(717001-07).

References

[1] Park, J.H., 2017, "Yearbook of Energy Statistics", Korea Energy Economics Institute.

- [2] Korea International Trade Association, 2015, “Book title”, Korea International Trade Association.
- [3] Korea Forest, 2015, “2014 Wood pellets statistics (based on end-2014)”, [http://www.forest.go.kr/newkfsweb/cmm/fms/BoardFileDown.do?atchFileId=FILE_000000000553700&fileSn=0&dwldHistYn=N&bbsId=BBSMSTR_1031&fn=2014년_Woodpellet_statistics\(2014\).pdf](http://www.forest.go.kr/newkfsweb/cmm/fms/BoardFileDown.do?atchFileId=FILE_000000000553700&fileSn=0&dwldHistYn=N&bbsId=BBSMSTR_1031&fn=2014년_Woodpellet_statistics(2014).pdf)
- [4] Lee, J.A., Oh, J.H., 2013, “Productivity and cost analysis of whole-tree harvesting system”, The Korea Institute of Forest Recreation Welfare Conference Book, 836-839.
- [5] Sim, B.S., Kim, H.J., Park, H.C., Kim, J.J., Choi, K.S., Kang, S.B., 2010, “Combustion characteristics of a wood pellet”, Proceedings of the Korea Society of Mechanical Engineers (KSME) Conference, 3624-3629.
- [6] Myrén, C., Hörnell, C., Björnbom, E., Sjöström, K., 2002, “Catalytic tar decomposition of biomass pyrolysis gas with a combination of dolomite and silica” *Biomass and Bioenergy*, **23**(3), 217-227.
- [7] Devi, L., Ptasinski, K.J., Janssen, F.J.J.G., van Paasen, S.V.B., Bergman, P.C.A., Kiel, J.H.A., 2005b. “Catalytic decomposition of biomass tars: use of dolomite and untreated olivine”, *Renewable Energy*, **30**(4), 565-587
- [8] Kafle, S., Euh, S.H., Cho, L.H., Nam, Y.S., Oh, K.C., Choi, Y.S., Oh, J.H., Kim, D.H., 2017, “Tar fouling reduction in wood pellet boiler using additives and study the effects of additives on the characteristics of pellets”, *Energy*, **129**, 79-85
- [9] Euh, S. H., 2016, “(A)study on tar fouling mechanism to improve the combustion system efficiency”, A Ph.D. thesis at Kangwon National University Graduate School. TD 660.6 –16-249.
- [10] Devi, L., Ptasinski, K.J., Janssen, F.J.J.G., 2003, “A review of the primary measures for tar elimination in biomass gasification processes”, *Biomass and Bioenergy*, **24**(2), 125-140
- [11] Devi, L., Ptasinski, K.J., Janssen, F.J.J.G., 2005, “Pretreated olivine as tar removal catalyst for biomass gasifiers: investigation using naphthalene as model biomass tar”, *Fuel Processing Technology*, **86**(6), 707-730
- [12] Lee, S.M., Ahn, B.J., Lee, O.K., Choi, S.H., Cho, S.T., 2017, “Standard for quality of wood pellet”, Korea Institute of Forestry. ISBN 978-89-8176-608-5 93520
- [13] Euh, S.H., Oh, K.C., Oh, J.H., 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*, **23**(3), 221-230.
- [14] Kang, S. B., Kim, H. J., Kim, J. J., Park, H.C., Choi, K.S., Sim, B.S., Oh, H.Y., 2011, “Performance characteristics of domestic wood pellet boilers”, Proceedings of the Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea (SAREK) Conference, 900-903.
- [15] Kang, S.B., Kim, H. J., Park, H. C., Sim, B. S., Kim, J. J., 2010, “Performance Characteristics of Domestic Wood Pellet Boiler”, Proceedings of the Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea (SAREK) Conference, 3613-3617.