

목재펠릿 연소 시 발생하는 타르, 재, 클링커 생성 특성 분석 및 함수율 변화에 따른 목재펠릿보일러의 성능 연구

어승희[†] · 오광철 · 오재현* · 김대현

강원대학교 바이오시스템공학과, *국립산림과학원 산림생산기술연구소
(2014년 3월 11일 접수, 2014년 9월 3일 수정, 2014년 9월 5일 채택)

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

Seung Hee Euh[†] · Kwang Cheol Oh · Jae Heun Oh[†] · Dae Hyun Kim*

Department of Biosystems Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, South Korea,

*Forest Practice Research Center, Korea Forest Research Institute, Pocheon, South Korea

(Received 11 March 2014, Revised 3 September 2014, Accepted 5 September 2014)

요약

본 연구에서는 목재펠릿의 연소 시 발생하는 타르, 재, 클링커의 생성 특성 분석과 더불어, 1등급 목재펠릿의 함수율에 따른 목재펠릿보일러의 성능 분석이 수행되었다. 타르는 목재펠릿이 연소됨에 따라 생성되어 연소실 전열면에 부착되었고, 전열면에 부착되거나 배기가스와 함께 배출되지 못한 재의 경우, 바닥면에 축적되었으며, 클링커는 3등급 목재펠릿의 연소 중에 버너부에서 생성, 고형화되는 것으로 나타났다. 목재펠릿의 등급이 결정되는 요인이므로써 함수율은 중요한 요인으로 작용된다. 벌채부산물을 이용한 목재펠릿은 불균일한 함수율로 인해, 연소 생성물의 발생량이 증가되는 경향을 나타내었으며, 이에 따른 연소시스템에서의 효율 저하, 시스템 작동 오류 등의 문제점이 발생되었다. 특히, 목재펠릿의 함수율에 따른 목재펠릿보일러의 성능 분석에서, 1등급 목재펠릿의 함수율이 6.6%p 증가하였을 때, 보일러효율이 약 27.08%p 감소되는 것으로 나타났다.

주요어 : 목재펠릿, 목재펠릿보일러, 함수율, 보일러효율, 타르

Abstract - This study reports the formation characteristics of tar, ash and clinker due to a wood pellet grade and the performance analysis of wood pellet boiler in terms of the moisture contents change of the wood pellet. Tar was accumulated on the heating surface according to combustion of wood pellet, the ash was yielded on the floor of combustion chamber in a wood pellet boiler and the clinker was solidified at the burner due to combustion of the 3rd grade wood pellet. Especially, the moisture contents is important factor to define the grade. Wood of logging residues has a non-uniform moisture contents after the field process, yields of tar, ash and clinker are increased in case of combustion due to the high ash contents. For these reasons, emission of harmful compounds in the exhaust gas, decrease of boiler efficiency and the system operating errors are observed. In the performance analysis of wood pellet boiler in terms of the moisture contents change of the 1st grade wood pellet, the boiler efficiency was reduced by 27.08% with 6.6% moisture contents increase. The optimum moisture contents of wood pellet is needed to improve the boiler performance and efficiency.

[†]To whom corresponding should be addressed.

Department of Biosystems Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, South Korea
Tel : 033-250-6496 E-mail : daekim@kangwon.ac.kr

Key words : Wood pellet, Wood pellet boiler, Moisture contents, Efficiency, Tar

1. 서 론

목질계 바이오매스 연료의 연소과정에서 발생하는 이산화탄소는 탄소동화작용에 의해 유기탄소화합물의 생산에 이용되므로 ‘탄소중립(Carbon Neutral)’ 에너지원으로 지정(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC, 2006)되어, 온실가스 감축 의무(Kyoto Protocol, 2005.02.16)에 대응 가능한 연료로서의 활용 가치는 상당하다. 특히, 목질계 바이오매스 연료에서 목재펠릿은 연소될 경우, 석유 연소 시 대비 질소산화물(NOx) 및 황산화물(SOx) 배출량은 약 1/12, 이산화탄소 배출량은 약 1/27로 분석되고 있다(1). 이러한 목질계 바이오매스 원료는 화석연료에 비해 부피가 크고 발열량이 낮으므로, 연료로서의 가치를 극대화하기 위한 가공이 요구된다. 특히, 목재펠릿은 톱밥 및 폐목재 등을 균일하게 파쇄·분쇄·압축 등의 성형 과정을 통해 제조되므로, 발열량을 향상시킬 수 있고, 15-30 kg 형태의 포장 및 제조가 가능하여, 수송 시 부피 감소에 따른 이익이 발생되고, 소규모 소매 형태의 공급이 가능하다. 또한 저위발열량 약 4,040 kcal/kg 이상, 함수율 약 15% 이하, 겉보기 밀도 약 500kg/m³ 이상 등의 특성을 나타내고 있으므로, 수송·저장과 더불어, 난방장치 등의 활용에 적합하다.

이러한 장점에도 불구하고, 별채부산물물을 활용한 목재펠릿은 현장 가공이 완료된 후 일정하지 않은 함수율을 나타내고, 높은 회분 함유율로 인해 연소 시 온도 변화에 따른 타르(tar), 재(ash), 클링커(clinker) 등의 발생이 증가되며, 이에 따른 연소시스템에서의 배기가스 중 유해물질 배출, 효율 저하, 시스템 작동 오류 등의 문제점이 발생되고 있다. 이와 관련하여, 선진국에서는 화석연료의 대체 에너지원으로써 산림 바이오매스를 목재펠릿, 바이오에탄올 등의 다양한 에너지 형태로 활용하고 있으며, 원목 부분보다는 목재 수확 과정에서 발생하는 잔가지 등의 부산물을 효율적으로 수집하여, 열 및 전기에너지 생산의 연료로 활용하고 있다. 별채 후 버려지는 부산물은 생산 임목의 약 40% 규모로, 임지에서는 별채나 숲가꾸기 작업 시 발생하는 가지, 후동목을 적극적으로 이용하

지 못하고 임내에 적치하고 있어 잔가지 등이 산업원료로의 전환이 요구된다.

이에, 본 연구에서는 1등급 및 3등급 목재펠릿을 이용하여 목재펠릿보일러 전열면 상 타르, 바닥면 재, 버너부 클링커의 생성 특성 분석 및 타르의 성분분석 그리고 함수율 변화에 따른 보일러효율(boiler efficiency)을 분석하고자 한다.

2. 국내·외 연구 현황

목재펠릿 및 목재펠릿보일러, 타르 생성 등에 관한 국내·외 연구 현황에 관해 고찰하였으며, 각 내용은 다음과 같다.

2-1. 국내 현황

현재, 목재펠릿보일러 사용 시 소요되는 연료비 분석(국립수목원, 2010)이 이루어졌고, 목재펠릿보일러 연소실 내부의 연소 및 열전달 특성 분석(2), 가정용 목재펠릿보일러 성능 특성 분석(3)이 수행되었으나, 목재펠릿보일러에서 목재펠릿의 연소과정에서 발생하는 타르, 재, 클링커의 특성에 관한 연구 및 목재펠릿의 함수율에 따른 보일러효율 분석에 관한 연구는 미미한 실정으로 향후 목재펠릿보일러의 보일러효율 향상을 위한 관련 연구가 요구된다.

변영철(2002)(4)은 전산유체역학(CFD)을 이용한 분석을 통해 순환유동층 보일러 내부의 분산 노즐의 특성이 클링커 생성에 미치는 영향을 분석한 결과, 클링커 생성을 최소화할 수 있는 노즐의 형태 및 배열을 제안하였으며, 클링커의 생성 원인은 비유동화 또는 재순환의 영역보다 열역학적 및 화학적 원인에 기인한 것으로 발표하였다.

강재별 등(2012)(5)은 가정용 목재펠릿보일러에서 연소 시 발생하는 클링커 생성에 관한 연구를 수행한 결과, 연소 시험 시 클링커가 발생되었을 때 클링커가 연소실 내부를 막게 되어 CO 발생량 증가 등의 증상이 발생되고, 화격자 자동 재처리 장치가 없을 경우, 2차 점화가 일어나지 않는 문제가 발생하는 것을 확인한 바 있다.

문지홍 등(2011)(6)은 탈휘발 과정과 char 가스화

과정에서 목질계 바이오매스의 타르 발생 특성에 관한 연구에서, 가스화 온도와 스팀 공급비에 따른 분석을 수행한 결과, 스팀의 공급비율 증가 시 타르 조성이 열분해 조건과 유사하게 나타나는 것으로 확인한 바 있다.

심봉석(2012)(7) 등은 목재펠릿의 연소 실험에서 화염의 형태, 연소 특성, 질량 변화를 도출하기 위한 가스화 모드 및 숯 연소 모드 등의 설정을 이용한 분석을 수행한 결과, 목재펠릿의 형상에 따른 초기 점화 및 불꽃 연소 시간차는 없는 것을 확인하였고, 숯 연소 모드에서는 공기 접촉 면적이 넓을수록 연소 시간이 단축되었으며, 연소 온도가 높을수록 질량 감소의 진행 속도가 증가되는 것을 확인한 바 있다.

심봉석(2012)(8) 등은 200,000 kcal/h 급 목재펠릿 연소 전용설비의 성능에 관한 연구를 수행한 결과, 가스버너식을 대체한 화염 길이가 긴 특성을 고려한 중앙노통식의 보일러로 설계하여, 낮은 CO 배출 성능을 나타내었고, 1차 공기의 공급이 원활하지 못한 경우, 목재펠릿이 완전 연소되지 않고, 재의 배출량이 증가하였으며, 화격자 하부의 1차 공기의 공급을 원활히 할 수 있도록 화격자를 제작하여 효율 변화 분석을 수행한 바 있다.

어승희(2013)(9) 등은 전산유체역학을 이용한 목재펠릿보일러 전열면의 타르 생성에 따른 열유동 특성에 관한 연구를 수행한 결과, 연소실 내 tar가 약 2 mm 두께로 생성된 경우, 생성되기 전 조건에 비해, 가스의 frame으로의 총열전달율(W)이 약 9.14% 감소되는 것으로 확인한 바 있다.

윤상준 등(2009)(10)은 촉매 개질기를 이용한 우드 칩 가스화 합성가스 내 tar 및 soot 제거에 관한 연구에서 니켈계열 Katalco 46-6Q 촉매가 감람석, 백운석에 비해 높은 제거율을 나타내고, 촉매 개질 온도가 증가함에 따라 tar 및 soot의 제거율이 증가되는 것으로 발표하였다.

음푸른별 등(2011)(11)은 바이오매스 열분해 및 가스화 시 타르의 거동을 실험적으로 분석한 결과, 타르는 열분해 시 바이오매스 탄소의 약 34%를 차지하고, 열적 분해와 char에 의한 촉매 분해를 통해 800 °C에서 2% 수준까지 저감시킬 수 있으며, 미세 표면적이 넓은 char 입자들을 이용하여 700 °C 이상의 온도에서 타르의 분해 반응을 증대시킬 수 있는 것으로 나타났다.

2-2. 국외 현황

스웨덴에서는 컴퓨터 프로그램 TRNSYS를 이용한 dynamic model을 정립하여 목재펠릿보일러의 성능 분석을 수행하였고(Persson, 2007)(12), 태양열 복합 펠릿 보일러의 경우 보일러 시동과 정지의 횟수를 줄일 수 있어서 이 때 발생하는 CO-emission을 절반으로 줄일 수 있다는 보고(Fiedler and Persson, 2009)(13)가 있었다.

Roberto Coll 등(2001)(14)은 바이오매스 가스화 타르 화합물에 대한 증기 개질 모델 연구에서, 바이오매스 가스화 타르의 주요 구성 화합물은 중량비로 고려하였을 때, Benzene은 37.9, Toluene 14.3, Naphthalene 9.6 등으로 나타났으며, Naphthalene이 바이오매스 가스화 타르의 대리분자로 이용할 수 있는 가장 적합한 화합물로 확인된 바 있다.

Z. Abu El-Rub 등(2004)(15)은 바이오매스 가스화 공정에서 타르 제거를 위한 촉매에 관한 문헌 연구를 수행한 결과, 촉매제는 크게 합성 촉매제와 미네랄로 구분되며, 합성 촉매제에는 숯, FCC촉매, 알칼리금속 탄산염, 황성알루미나 등이 포함되고, 미네랄에는 calcined 광석, 감람석, 점토광물, 철금속산화물 등이 포함되는 것으로 나타났다.

Ender Ozden(2010)(16) 등은 shell and tube heat exchanger에 대한 연구에서 baffle cut과 shell diameter의 열전달계수 및 압력강하에 대해 수치적 모델링을 통한 조사와 더불어, baffle 및 turbulent 흐름의 변화 등의 변수를 갖는 single shell 및 single tube pass heat exchanger에 대한 CFD 시뮬레이션이 수행되었으며, 최적의 turbulent 모델은 열전달계수, 출구 온도, 압력 강하 등의 결과 등을 비교함으로써 결정되는 것으로 나타났다.

Joel Chaney(2012)(17) 등은 small-scale fixed-bed 바이오매스 보일러 시스템의 문헌 연구를 통한 연소 모델링 등의 연구를 수행한 결과, source term을 이용함으로써 fuel bed 내에 있는 discrete 영역으로부터 combustion products가 방출되는 것으로 나타났고, 2차 공기의 위치는 fuel bed에 근접, volatile species를 포함하는 species transport model 등이 평가되었으며, 1차 및 2차 공기비에 대한 최적화 모델 등의 적용이 요구되는 것으로 나타났다.

Mohammad Davood Ahanj(2012)(18) 등은 radiant tube heater의 연소 및 복사열전달에 대한 CFD 연구를 수행하였고, radiant tube 및 설치 공간 내 등의 온

도 측정과 함께 과잉공기비, 공기 예열 등의 효과 분석이 이루어졌으며, higher value의 과잉공기비는 heater의 효율을 감소, 공기 예열은 heater의 효율에 긍정적 효과를 발생시킬 수 있는 것으로 나타났다.

3. 재료 및 방법

본 연구에 적용된 목재펠릿보일러는 출력 약 20,000 kcal/h의 3PASS 입형 연관 구조로, 연소실 (1st PASS) 내부에 설치된 버너에서 목재펠릿 및 유입된 공기의 연소가 발생된 후 생성된 연소가스가 상부로 이동된 후 spring을 포함하는 연관 5개가 설치된 2nd PASS를 통과한 후 2nd Pass와 3rd Pass 사이에 설치된 16 mm 두께의 격판(separation disc)에 의해 연소가스의 흐름 방향이 통제되고, baffle plate가 설치된 3rd PASS를 통과한 후 상단에 설치된 배풍기에 의해 외부로 배출되는 구조를 갖는다. 버너부에서 최초 발생된 연소가스는 연소실, 2nd PASS 그리고 3rd PASS를 통과하면서, 주위에 열매체에 의해 열손실이 발생되고, 난방 용수는 3rd PASS 하단 후면으로 배출되고, 목표 지점에서 열손실이 발생된 후 연소실 상단으로 환수된다. 연소 가스의 흐름 등을 나타내는 개요도는 Fig. 1과 같다.

본 연구에 적용된 목재펠릿보일러의 연관은 총 2행 5열로 구성되어 있고, 연관은 길이 828 mm, 내경 42 mm, 두께 3.3 mm인 일반 배관용 탄소 강관(SPP)으로 각각의 연관 내부에는 baffle이 설치되어 있으며, 시스템 후면 상단에는 배풍기가 설치되어 연소 가스가 외부로 배출될 수 있도록 설치되어 있다. 연관 내부에 설치된 baffle은 탄소강(SS400) 재질로 spring 및 baffle-plate 유형으로 구분되고, 길이는 각각 503.1 mm, 641.5 mm 이며, 개략도는 Fig. 2와 같다.

목재펠릿보일러의 성능 시험은 산업통상자원부 기술표준원(Korean Agency for Technology and Standards, KATS)의 표준번호 KS B 6205(2008.12.19)의 표준번호를 갖는 육상용 보일러의 열정산 방식(LAND BOILERS - HEAT BALANCING)을 기준으로 한 1등급 목재펠릿(Larch 80%, Oak 20%) 및 3등급 목재펠릿(Rigida 100%)을 이용하여 분석되었으며, 이와 더불어 타르, 재, 클링커 특성 및 1등급 목재펠릿을 기준으로 한 함유율 변화에 따른 보일러효율 분석이 수행되었다.

성능 분석을 위해 적용된 가정용 목재펠릿보일러

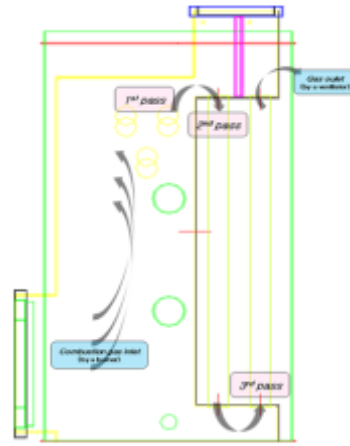


Fig. 1. Flue gas flow in wood pellet boiler

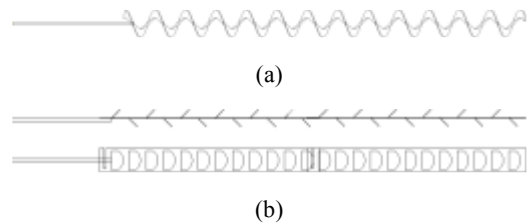


Fig. 2. Schematic of two types of the baffle

(K-20A, Kyuwontech CO. LTD., KOREA)는 한국 산업기술시험원의 성능 검증이 완료된 시스템(시험 성적서 번호 12-1452-82)으로, 강원도 춘천시 강원대학교 농업생명과학대학 바이오시스템공학과 농업공학실 뒤편 외부의 공간(4.0×3.5×3.0 m3)에 설치되었으며, 보일러의 운전환경은 실제 가정에 설치되는 환경을 고려하여, Sandwich panel이 주위에 시공되어 외부로부터의 일사, 바람, 강우 등의 환경변화에 의한 성능시험에 대한 영향을 최소화하였다. 목재펠릿보일러에서 가열된 후 배출되는 난방수의 열적 부하를 설정하기 위해 약 4.777 kcal (20,000 J)의 열교환기가 설치된 출력시험장치가 설치되어, Water tank로부터 공급되는 냉매(물)에 의해 열교환기에서 난방수의 열손실이 발생된 후 목재펠릿보일러 내부로 환수되도록 설계하였다.

약 3,000 kg급 water tank로부터 열교환기가 설치된 출력시험장치 배관을 따라 순환되는 냉매(물)는 순환펌프(PW-200SMA, WILO CO. LTD., GERMANY)에 의해 열교환기로 공급된 후, 고온의 난방수를 냉각시킨 후, 開 loop 시스템에 의해 외부로 drain되도록 설계되었다. 순환되는 냉매(물)의 체

적유량(L/min)은 순환펌프의 출구에 설치된 터빈유량계(B110-500, Blancett Inc., USA)에 의해 측정되었다. 출력시험장치 배관의 입·출구는 2쌍으로, 목재펠릿보일러의 유출구 및 유입구와의 연결부, water tank의 유출구 및 배출구와의 연결부로 구성되며, 각 입·출구에 K-type 열전대(thermocouple)가 설치되어 온도가 측정되었다. 추가적으로, 외기 온도, 배기가스 온도 등이 측정되었다. 각 부에서 측정된 순환유량, 온도 등의 데이터는 Data-logger (GL800, Graphtech, Japan)에 의해 단위 시간 간격으로 수록, 저장된 후 결과 분석에 이용되었다.

목재펠릿의 등급에 따른 목재펠릿보일러의 분석에 적용된 목재펠릿의 등급은 1등급 및 3등급으로, 1등급 목재펠릿의 함수율은 약 10% 이하, 3등급 목재펠릿의 함수율은 약 15% 이하를 만족하며, 이를 포함하는 목재펠릿의 규격·품질 기준(국립산림과학원, 고시 제2013-5호, 2013)은 Table 1과 같다.

‘한국산업기술시험원’의 신재생에너지설비 인증 심사 기준을 통한 목재펠릿의 저위발열량(H_i)은 목재펠릿보일러의 연료인 목재펠릿의 사용량(G) 공급수의 양(G_h), 함수율(moisture contents, MS) 등을 고려한 식 (1)을 통해 산출된다.

$$H_i = H_h (1 - MS/100) - 600[9H(1 - MS/100) + MS]/100 \quad (1)$$

총 유입 열량(Q_i)은 펠릿의 저위발열량(H_i)과 목재펠릿 소비량(G)을 고려한 식 (2)로 표현되고, 총 유출 열량(Q_o)은 공급수의 양(G_w), 열매체(물)의 비열(C_p), 열매체의 입·출구 온도차를 고려한 식 (3)으로 표현된다.

$$Q_i = H_i \times G \quad (2)$$

$$Q_o = G_w \times C_p \times (T_2 - T_1) \quad (3)$$

보일러 효율(η)은 총 유입 열량(Q_i)과 총 유출 열량(Q_o)의 비율로 표현되고, 그 결과는 약 91.4%로 산출되며, 식 (4)와 같다.

$$\eta = \frac{Q_o}{Q_i} \times 100(\%) \quad (4)$$

Table 1. Quality standards of wood pellet (Korea Forest Institute, 2013)

Characteristics	Unit	1st grade	2nd grade	3rd grade	4th grade
Diameter	mm	6-8	6-8	6-8	6-20
Length	mm	≤32	≤32	≤32	≤32
Apparent density	kg/m ³	≥640	≥600	≥550	≥500
Moisture contents	%	≤10	≤10	≤15	≤15
Ash	%	≤0.7	≤1.5	≤3.0	≤6.0
Fines	%	<1.0	<1.0	<2.0	<2.0
Durability	%	≥97.5	≥97.5	≥95	≥95
Heating value	kcal/kg	≥4,300	≥4,300	≥4,040	≥4,040
Sulfur	%	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Chlorine	%	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Nitrogen	%	<0.3	<0.5	<0.7	<1.0
Arsenic	mg/kg	≤1.0	≤1.0	≤1.0	≤1.0
Cadmium	mg/kg	≤0.5	≤0.5	≤0.5	≤0.5
Chrome	mg/kg	≤10	≤10	≤10	≤10
Copper	mg/kg	≤10	≤10	≤10	≤10
Lead	mg/kg	≤10	≤10	≤10	≤10
Mercury	mg/kg	≤0.05	≤0.05	≤0.05	≤0.05
Nickel	mg/kg	≤10	≤10	≤10	≤10
Zinc	mg/kg	≤100	≤100	≤100	≤100
Additives	%	<2.0	<2.0	<2.0	<2.0

목재펠릿보일러의 타르 생성 실험에 적용된 1등급 목재펠릿은 약 80%의 낙엽송(larch), 약 20%의 참나무(oak)로의 구성을, 3등급 목재펠릿은 약 100%의 리기다(Rigida) 소나무 구성을 나타낸다.

목재펠릿보일러의 전열면 타르(tar) 생성에 따른 성능 분석을 위해, 타르 생성을 위한 시스템 총 작동 시간은 약 27.33시간, 총 작동 횟수는 70회의 조건으로 수행되었으며, 버너가 설치된 입구, 버너가 설치된 입구 반대, 화염 관찰 창이 설치된 측면 입구, 측면 입구 반대 방향의 전열면에 철판(17.5 mm×17.5 mm×3 mm)이 각각 바닥면 기준 370 mm, 340 mm, 370 mm, 290 mm 높이에 석고접착제에 의해 부착되었다. 실제 각 전열면에 부착된 철판의 사진은 Fig. 3과 같다.

목재펠릿보일러 전열면 4면에 생성된 타르에 대한 성분은 GC/MSD 및 SPME를 이용하여 분석(2013.10.11., 동년.동월.18.)되었으며, 분석기기는 GC/MSD (Aglient 7890A / 5975C)가 이용되었다. 분석 조건은 Table 2와 같다.



Fig. 3. Iron plate sticking on the heating surface of the combustion chamber

4. 실험 결과 및 고찰

4-1. 목재펠릿 등급에 따른 전열면 타르 및 바닥재 생성 특성

목재펠릿보일러의 전열면 타르 생성에 따른 성능 분석의 수행을 위해 적용된 1등급 목재펠릿은 약 80%의 낙엽송(larch), 약 20%의 참나무(oak)로의 구성을, 3등급 목재펠릿은 약 100%의 리기다(Rigida) 소나무 구성을 나타낸다. 버너가 설치된 입구, 버너가 설치된 입구 반대, 화염 관찰 창이 설치된 측면 입구, 측면 입구 반대 방향의 전열면에 철판이 부착되었으며, 1등급 펠릿을 이용한 타르 생성 실험 결과는 Fig. 4와 같다.

각 4면의 전열면에 대해서 생성된 타르의 양을 측정한 결과, 버너가 설치된 입구 반대면에 90.75 g/m²으로 가장 많은 타르가 발생된 것으로 나타났으며, 전열면 바닥에 쌓인 재의 양은 756.89 g으로 나타났다(Table 3).

3등급 목재펠릿을 이용한 타르 생성 실험은 총 작동 시간 및 총 작동 횟수를 1등급 목재펠릿을 이용한 타르 생성 실험과 동일한 조건으로 수행되었으며, 3등급 펠릿을 이용한 타르 생성 실험 결과는 Fig. 5와 같다.

각 4면의 전열면에 대해서 생성된 타르의 양을 측정한 결과, 3등급 목재펠릿을 이용한 타르 생성 실험에 의한 결과 역시, 버너가 설치된 입구 반대면에 79.88 g/m²으로 가장 많은 타르가 발생된 것으로 나타났으며, 전열면 바닥에 쌓인 재의 양은 3303.25 g으로 1등급 대비 약 4배 이상 많은 양이 생성된 것으로 나타났다(Table 4).

Table 2. Analytical condition of tar

■ 분석조건	
● GC Column	: HP-5 (30×0.25mm, 0.25 μ m)
● Column flow rate	: 1.0 mL/min, He
● Inlet	
▶ Injection	: SPME (SPME fiber: CAR/PDMS 75 μ m)
▷ Absorption	: 60 $^{\circ}$ C, 20min
▷ Desorption	: 250 $^{\circ}$ C, 2min
▶ Mode	: Splitless
▶ Temperature	: 280 $^{\circ}$ C
● Oven	: 50 $^{\circ}$ C(0min)-10 $^{\circ}$ C/min-280 $^{\circ}$ C(10min)
● Detector	
▶ Mode	: MSD
▶ Ion source	: EI, 70 eV
▶ Ion source temperature	: 280 $^{\circ}$ C
▶ Scan range	: 50~800 m/z
▶ Solvent delay time	: 0 min

Table 3. Tar formation characteristics on each heating surface (1st grade wood pellet)

Measured Position	Mean Weight per Unit Area (g/m ²)	Mean Weight per Unit Time (g/m ² ·h)	Mean Weight per Operation (g/m ² ·No.)	Total Ash Yields (g)
Inlet	25.99	0.95	0.37	756.89
Opposite of Inlet	90.75	3.32	1.30	
Side Inlet	39.61	1.45	0.57	
Opposite of Side Inlet	37.84	1.38	0.54	

이와 같이, 버너가 설치된 입구 반대면에 타르가 가장 많이 생성되는 것은 외부로부터 유입되는 공기에 의해 화염 및 연소가스가 입구 반대면에 접촉되고, 이에 의해 타르 등이 지속적으로 공급되며, 특히, 화염 형성 라인 하단부에 vortex 형상으로 인한 정체구역이 발생되어, 타르의 생성량이 각각 90.75 g/m² 및 79.88 g/m²으로 가장 많이 발생된 것으로 판단된다.

4-2. 목재펠릿의 버너부 클링커 생성 특성

버너부에서 발생하는 클링커는 1등급 목재펠릿의 연소과정에서는 발생되지 않고, 단지 버너부에서 재의 형태로 생성되었으나 자동 재처리장치에 의해 주기적으로 제거되어, 문제가 발생되지 않았으나, 3등급 목재펠릿의 연소과정에서는 약 15분 주기로 보일러의 작동이 ON/OFF 되는 동안 목재펠릿의 휘발분

Table 4. Tar formation characteristics on each heating surface (3rd grade wood pellet)

Measured Position	Mean Weight per Unit Area (g/m ²)	Mean Weight per Unit Time (g/m ² ·h)	Mean Weight per Operation (g/m ² ·No.)	Total Ash Yields (g)
Inlet	36.66	1.34	0.52	3303.25
Opposite of Inlet	79.88	2.93	1.14	
Side Inlet	27.94	1.02	0.40	
Opposite of Side Inlet	42.03	1.54	0.60	

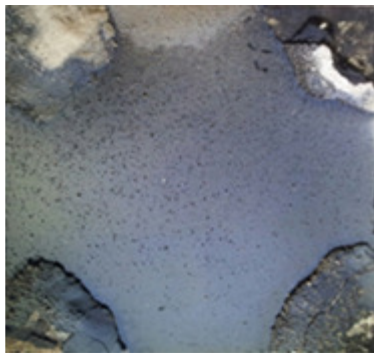






Fig. 4. Tars on the heating surface

이 완전 기화되는 것이 저해되고, ash 등의 기화 후 응축, 리그닌, 타르 등의 점착 유도 물질 등에 기인하여, ash, wood pellet (sawdust), tar 등이 서로 융합되어, 목재펠릿의 분해연소가 일어나는 버너, 가스 유동의 정체 구역 등에서 발생, 축적되며, 타르 생성 실험 중 발생된 클링커의 형상은 Table 5와 같다.

목재펠릿보일러 작동 시작 시점으로부터 20분, 45분, 105분, 195분 등의 시점에서 Table 14에 나타난 바와 같이 클링커가 생성되는 것이 확인되었으며, 특히, 연료투입구로부터 버너의 상단부에 클링커가 발생될 경우, 시스템 작동 오류가 발생되어 시스템이 정지되는 등의 문제점이 발생되었다. 이러한 클링커의 생성에 따라 1차 공기 투입구로의 산화제 입력은 저해되고, 2차 공기 투입구를 통한 산화제의 입력은 1차 공기 투입구로의 산화제 입력 손실분에 의해 증가된 산화제 입력량이 2차 공기 투입구로 입력되는 구조를 나타낸다.

Table 5. Clinker characteristics

	clinker1	clinker2	clinker3	clinker4
Actual form				
Formation time (min)	20	45	105	195
Weight (g)	78.54	97.50	112.14	108.94
Size (mm ³)	326,399	359,893	573,237	345,807

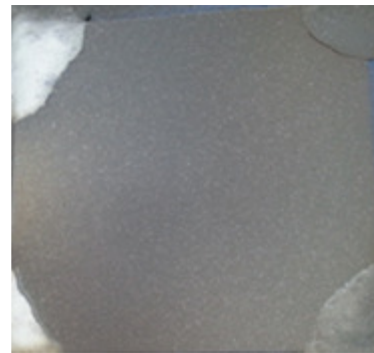


Fig. 5. Tars on the heating surface

4-3. GC/MSD 및 SPME를 이용한 타르의 성분 분석

분석된 그래프에서, y축은 abundance 값을 나타내고, x축은 약 70eV를 가했을 때 나타나는 분자량의 범위로, 이온화 된 pattern을 나타내는 값을 나타낸다. 분석된 결과는 Fig. 6과 7을 통해 나타내었다.

이 때, 생성된 물질은 Cyclohexanone, Oxime\$ Cyclohexanone 등이며, 여기서 '\$'표시는 두 분자의 결합을 나타내고, 화합물의 구분을 위해 규정된 화합물 번호(American Ceramic Society)인 Chemical abstracts service (CAS) number는 000100-64-1로 나타났고, 분자 앞의 상수(ex> 2,2,5,5-)는 분자의 작용기가 연결되어 있는 위치를 의미하고, 분자화학식은 C6H11NO로 나타났으며, 5.062min에 해당되는 분자 화합물에 대한 결과는 Fig. 6과 같다. 여기서, match quality는 100에 가까울수록 해당 물질의 정확도를 나타내는 값으로 47 이하의 값으로 나타나, 해당 물질과의 연관성이 낮은 것으로 나타났다. Fig. 7에서 5.423min에 나타난 물질은 Cyclotetrasiloxane과

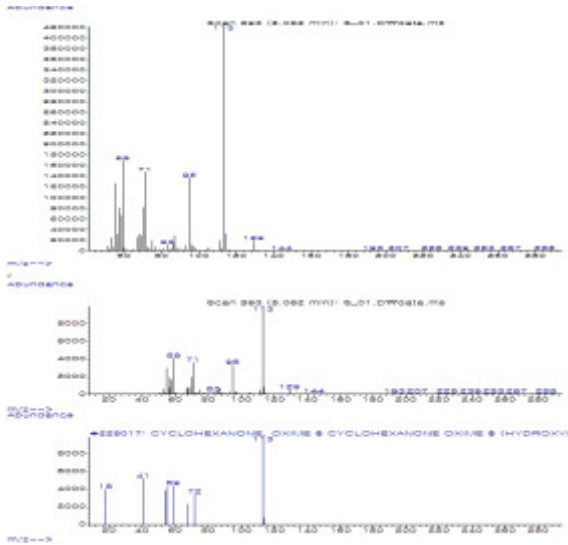


Fig. 6. Analysis results of tar component at 5.062min.

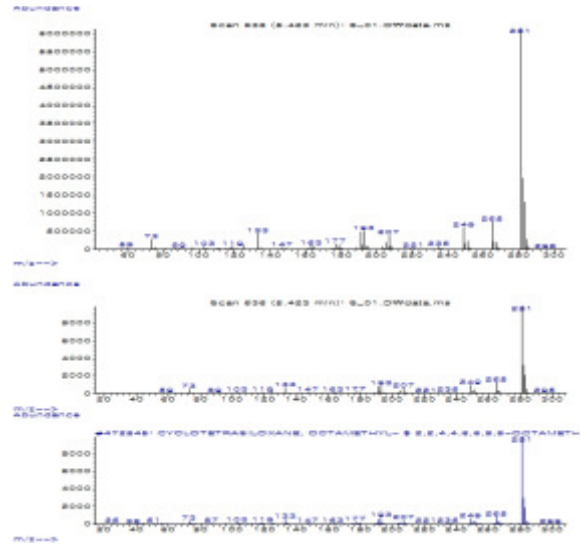


Fig. 7. Analysis results of tar component at 5.423min.

Table 6. Performance analysis in terms of moisture contents of the 1st grade wood pellet

	Moisture content	
Boiler Output	7.8%	14.4%
Mean Temp. of water inlet (°C)	45.71	49.93
Mean Temp. of water outlet (°C)	70.12	69.92
Temp. difference (°C)	24.41	19.99
Boiler efficiency (%)	93.65	66.57
Reduction rate of efficiency (%p)	-	27.08

Octamethyl-이며, CAS number는 00556-67-2이고, match quality는 98로 해당 물질의 정확도가 매우 높게 나타난 것을 확인할 수 있다. 이에, match quality 90이상의 값을 나타내는 성분을 살펴보면, C₈H₂₄O₄Si₄(CAS No. 000556-67-2), C₁₀H₃₀O₅Si₅(CAS No. 000541-02-6), C₁₂H₃₆O₆Si₆(CAS No. 000540-97), C₁₄H₂₀O₂(CAS No. 000719-22-2), C₁₄H₄₂O₇Si₇(CAS No. 000107-50-6) 등이 생성된 것으로 나타났다.

4.4. 1등급 목재펠릿의 함수율에 따른 목재펠릿보일러의 성능 분석

목재펠릿의 함수율에 따른 목재펠릿보일러의 성능 분석을 위해 최초 약 7.8%의 함수율을 갖는 1등급 목재펠릿을 이용하였으며, 이를 각각 13.4% 및 14.4%로 함수율을 높여, 성능분석(KS B 6205,

KATS, KOREA, 2008)을 정격 부하 이상에서 정상 상태(steady state)를 최소 2시간 이상으로 하여, 각각 수행되었다. 각 결과는 Table 6과 같다.

1등급 목재펠릿의 함수율이 6.6% 증가하였을 때, 보일러효율이 약 27.08%p 감소되는 것으로 나타났다. 이는 목재펠릿의 함수율의 증가로 인한 발화의 지연 및 연료 내 휘발분의 단위 시간당 공급량의 감소로 인해 발열량이 감소되어, 보일러효율이 27.08% 감소된 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 목재펠릿을 이용하여 목재펠릿보일러 전열면 상 타르, 바닥면 재, 버너부 클링커의 생성 특성 분석 및 타르의 성분분석 그리고 함수율 변화에 따른 보일러효율(boiler efficiency)을 비교 분석하였다.

목재펠릿의 등급에 따른 목재펠릿보일러 전열면 타르 및 바닥면 재의 생성 특성에 관한 분석에서, 버너가 설치된 입구 반대면에 타르가 가장 많이 생성되는 것은 외부로부터 유입되는 공기에 의해 화염 및 연소가스가 입구 반대면에 접촉되고, 이에 의해 타르 등이 지속적으로 공급되며, 특히, 화염 형성 라인 하단부에 vortex 형성으로 인한 정체구역이 발생되어, 타르의 생성량이 가장 많이 발생된 것으로 판단된다. 이에, 타르 생성의 억제를 통한 보일러효율의 향상 방안의 검토 및 관련 연구가 필요하다.

3등급 목재펠릿의 연소과정에서 약 15분 주기로

보일러의 작동이 ON/OFF 되는 동안 목재펠릿의 휘발분이 완전 기화되는 것이 저해되고, ash 등의 기화 후 응축, 리그닌, 타르 등의 점착 유도 물질 등에 기인하여, ash, wood pellet (sawdust), tar 등이 서로 융합되어, 목재펠릿의 분해연소가 일어나는 버너, 가스 유동의 정체 구역 등에서 발생, 축적되었으며, 이는 시스템 작동 오류가 발생되어 시스템이 정지되는 등의 문제점이 발생되었다. 이에, 연료투입구 하단부와 버너부 상단부 사이에서 발생하는 클링커를 제거시키기 위해서는 버너의 깊이 증가 등의 구조적 설계 변경 등이 요구된다.

목재펠릿의 함수율에 따른 목재펠릿보일러의 성능 분석에서, 1등급 목재펠릿의 함수율이 6.6%p 증가하였을 때, 보일러효율이 약 27.08%p 감소되는 것으로 나타났다. 이는 목재펠릿의 함수율의 증가로 인한 발화의 지연 및 연료 내 휘발분의 단위 시간당 공급량의 감소로 인해 발열량이 감소되어, 보일러효율이 27.08%p 감소된 것으로 판단된다. 이에, 목재의 종류에 따른 목재펠릿의 형상이 유지될 수 있는 최소 함수율의 정립이 요구되며, 이는 보일러효율의 향상에 결정적 요인으로 작용하는 것으로 나타났다.

목재펠릿보일러 전열면에 생성된 타르의 성분분석 결과, 각각의 생성분에 대한 유해물질 여부의 판별이 요구되며, 유해물질에 대한 저감 연구와 더불어, 타르 등의 제거에 관한 연구가 필요한 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 국립산림과학원의 연구비 지원(과제번호 : C1009461-01-01) 및 2014년도 강원대학교 학술연구 조성비(과제번호 : 120140390)로 수행되었습니다.

References

1. Lee, J. I., Kim, H. J., So, H. J., "A Study on the Energy Utilization of Woody Biomass," Gyeonggi Research Institute, 2009.
2. Ahn, J., Kim, J. J., Park, B. S., "Combustion and Heat Transfer Characteristics inside the Combustion Chamber of a Wood Pellet Boiler," The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, Winter Conference, 2011, pp. 363-366.

3. Kang, S. B., Kim, H. J., Kim, J. J., Park, H. C., Choi, K. S., "Performance Characteristics of Domestic Wood Pellet Boilers," The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, Summer Conference, 2011, pp. 900-903.
4. Byun, Y. C., Kim, E. K., Park, S. H., Hwang, J. H., Lee, J. M., Kim, J. S., "Study of Nozzle Characteristics on Clinker Formation in a CFBC Boiler with CFD Calculation," The Korea Society for Energy Engineering, 2002, Vol. 11, No. 3, pp. 224-229.
5. Kang, S. B., Kim, J. J., Choi, K. S., Park, J. W., Sim, B. S., Oh, H. Y., "A Study on Production of Clinker, Byproduct of Combustion in a Domestic Wood Pellet Boiler Burner," The Korea Society for Energy Engineering, Spring Conference, 2012, pp. 78.
6. Moon, J. H., Lee, U. D., Ryu, C. K., Lee, Y. M., Bae, W. K., "Characteristics of Tar Generation during the interval of Gasification of Woodchip," The Korean Society of Combustion, 2011, Vol. 16, No. 1, pp. 8-14.
7. Sim, B. S., Kim, H. J., Park, H. C., Kim, J. J., Choi, K. S., Kang, S. B., "Combustion Characteristics of a Wood Pellet," The Korean Society of Mechanical Engineers, Spring Conference, 2012, pp. 276-278.
8. Sim, B. S., Kim, J. J., Choi, K. S., Kang, S. B., Mun, J. S., Oh, H. Y., "Performance Characteristics of Wood Pellet Combustion Facilities 200,000 kcal/h-class," The Korean Society of Mechanical Engineers, Spring Conference, 2012, pp. 276-278.
9. Euh, S. H., Oh, J. H., Ju, Y. M., Huh, J. N., Kim, D. H., "A Thermal Flow Analysis of Tar Scaled Heating Surface in a Pellet Boiler Using CFD," Korean Society for Agricultural Machinery, Spring Conference, 2013, pp. 95-96.
10. Yoon, S. J., Son, Y. I., Kim, Y. K., Lee, J. G., "Removal of Tar and Soot in the Syngas Produced from Gasification of Wood Chip by

- using Catalytic Reformer,” The Korean Hydrogen and New Energy Society, 2009, Vol. 20, No. 6, pp. 519-525.
11. Eum, P. R. B., Lee, Y. W., Ryu, C. K., Park, Y. K., “Experimental Study on Thermal Cracking of Tar and Effect of Char in Biomass Gasification,” The 43th KOSCO SYMPOSIUM, 2011, pp. 211-214.
 12. Persson Tomas, Fiedler Frank, Nordlander Svante, Bales Chris, Paavilainen Jane, “Validation of a dynamic model for wood pellet boilers and stoves,” Applied Energy, 2009, Vol. 86, No. 5, pp. 645-656.
 13. Frank Fiedler and Tomas Persson, “Carbon Monoxide Emissions of Combined Pellet and Solar Heating Systems,” Applied Energy, 2009, Vol. 86, pp. 135-143.
 14. Roberto Coll, Joan Salvado, Xavier Farriol, Daniel Montane, “Steam Reforming Model Compounds of Biomass Gasification: Conversion at Different Operating Conditions and Tendency towards Coke Formation,” Fuel Processing Technology, 2001, Vol. 74, pp. 19-31.
 15. El-Rub, Z. Abu, Bramer, E. A., Brem, G., “Review of Catalysts for Tar Elimination in Biomass Gasification Process,” Laboratory of Thermal Engineering, 2004, Vol. 43, No. 22, pp. 6911-6919.
 16. Ender Ozden, Ilker Tari, “Shell Side CFD Analysis of a Small Shell-and-tube Heat Exchanger,” Energy Conversion and Management, 2010, Vol. 51, pp. 1004-1014.
 17. Joel Chaney, Hao Liu, Jinxing Li, “An Overview of CFD Modelling of Small-scale Fixed-bed Biomass Pellet Boilers with Preliminary Results from a Simplified Approach,” Energy Conversion and Management, 2012, Vol. 63, pp. 149-156.
 18. Mohammad Davood Ahanj, Masoud Rahimi, Ammar Abdulaziz Alsairafi, “CFD Modeling of a Radiant Tube Heater,” International Communications in Heat and Mass Transfer, 2012, Vol. 39, pp. 432-438.