

안전성을 고려한 고효율 목재펠릿 보일러 개발

정찬홍 · 박민철

대구대학교 화학공학과

Development of a High Efficiency Wood Pellet Boiler with Improved Safety

Chan Hong Chung · Min Cheol Park

Dept. of Chemical Engineering, Daegu University

Abstract

Wood pellet is one of biomass energy fuels, which is produced by compressing woody biomass such as sawdust, planer shavings, and whole-tree removal or tree tops and branches leftover after logging into cylindrical form. Latterly much attention has been paid to wood pellet boiler which is suitable for use at various scales in domestic and industrial furnaces for heat production to replace conventional fossil fuel energy sources since the use of wood pellet that is carbon neutral can alleviate global warming.

This study presents the result of developing a high efficiency wood pellet boiler with 55MJ/h capacity. Efficiency has been improved by using a rotating disk burner with a shorter screw feeder. Special attention has been paid to the improvement of the safety of the wood pellet boiler from backfire by adopting a double protecting system composed of a shutter and an air curtain. The result shows that the efficiencies of the wood pellet boiler are 97.2% and 89.2% based on lower and higher heating values, respectively, at 15.1kW of heating output.

Keywords : Wood Pellet(목재펠릿), Pellet Boiler(펠릿보일러), Safety(안전성),
High Efficiency(고효율), Burner(연소기), Screw Feeder(스크류식 연료공급기)

1. 서론

산림바이오매스의 한 종류인 목재펠릿은 목재 부산물 등을 톱밥으로 과쇄한 후 압축하여 만든 지름 6~8mm, 길이 약 30~50mm인 펠릿형태의 목재연료로, 연소 시 광합성으로 흡수한 이산화탄소를 배출하는 것이므로 기후변화협약에서 온실가스 배출이 없는 것으로 인정된 탄소중립의 저공해 친환경연료이다. 목재펠릿은 1979년 탄생한 이후 1982년 스웨덴에 세계최초의 펠릿공장인 Mora Pellet Fabrik가 설립되어 시작되었다. 하지만 임산업보호를 위한 원료사용 규제, 원자력 발전의 추진, 원유가격의 하락 등의 이유로 펠릿생산 및 펠릿보일러 관련 연구가 아주 느리게 진행되었다. 이후 2000년대 중반에 들어와 원유가격의 세계적인 급등현상으로 인하여 유럽 및 북미를 중심으로 급속하게 확대되었다.

정부에서는 녹색성장과 부합되는 목재펠릿의 보급확대 정책을 적극 추진 중으로, 국내 목재펠릿 수요는 2009년 3만 톤에서, 2020년에 500만 톤으로 10년간 약 170배의 수요증가가 있을 것으로 예측된다(산림청(2009)). 우리나라의 경우 2000년대 초반 펠릿 관련 연구가 시작되었고 2004년 펠릿 수입이 개시되었으며, 2000년대 후반에야 펠릿의 생산이 시작 되는 등 현재 국내의 목재펠릿 및 펠릿 보일러 기술 수준은 선진국에 비하여 낙후 되어있는 실정이다.

펠릿보일러는 목재펠릿 연료를 사용하는 대표적 제품으로, 가정에서 주로 사용되고 있는 20,000kcal/h~100,000kcal/h의 소형과 에너지 수요가 큰 원예 및 산업용의 중대형 보일러로 나눌 수 있다. 현재 국내의 목재펠릿 보일러 이용 중에 발생하는 소비자 불만족의 대부분은 목재펠릿의 품질보다는 연소기의 기술 수준 낙후 및 안전성 문제로 인한 불만족이 급증하고 있는 추세로 목재펠릿 보일러 수요 확대에 걸림돌로 작용하고 있는 실정이다. 기존의 중소형 펠릿 보일러는 대부분 펠릿이 연소하는 버너의 하부에 뚫려있는 구멍을 통하여 공기를 주입하는 송풍 방식의 화격자형 버너로 되어 있고 연료공급은 스크류 연료피더 방식을 채택하고 있어서 일정 기간이 경과하면 연료투입 스크류에 펠릿 가루가 퇴적되는 현상이 발생하여 연료공급이 제대로 되지 않는 등 고장이 잦고, 스크류에 펠릿이 파괴되어 상당량이 분말형태로 버너에 공급되므로 하부에서 주입되는 공기에 의해 쉽게 부양되어 분산되므로 발화 불쏘시게 역할과 불완전 연소 및 재발생의 원인이 되고 있으며, 연료공급 스크류가 고온에 노출되어 불꽃의 역류 현상으로 인한 역화에 의한 화재위험이 높아 안전성에 문제가 있는 등의 단점이 있다.

본 연구의 목적은 기존 펠릿보일러의 단점을 보완한 구조가 간편하고 사용이 편리하며 안전성이 높은 소형 펠릿보일러를 개발하는 것이다. 이를 위하여 고효율의 회전원판식 연소버너를 개발하고, 또한 격벽 및 공기차단막의 2중 역화방지장치를 개발하여 불꽃의 역류 현상을 최소화함으로써 역화에 의한 화재위험이 없는 안정성을 고려한 펠릿 보일러를 개발하고자한다.

2. 펠릿 보일러

2.1 목재 펠릿

고유가 시대의 도래와 온실가스 배출로 인한 지구온난화가 심각한 문제로 대두됨에 따라 화석 연료를 대체할 수 있는 신재생에너지 개발의 중요성이 점점증하고 있다(McKendry(2002)). 목재 펠릿은 1970년대 오일쇼크를 계기로 석유를 대체할 에너지원으로 개발되었다. 비화석 바이오매스의 한 종류인 목재펠릿은 목재 부산물(임산 잔재물, 임목벌채 부산물, 가공 부산물 등)을 톱밥으로 파쇄한 후 목재가 가지고 있는 자체성분의 하나인 리그닌이 접착제 역할을 하여 압축성형한 것으로, <그림 1>과 같이 지름 6~8mm, 길이 약 30~50mm인 펠릿형태의 목재연료이다. 광합성에 의한 산림바이오매스를 원료로 하는 목재펠릿은 1톤당 등유 대비 약 3톤의 이산화탄소 저감효과가 있으므로 신고유가시대에 경제성은 물론이고 저탄소 녹색성장에 기여할 수 있는 신재생에너지 중의 하나이다(한규성(2010)).



<그림 1> 목재펠릿

<표 1> 목재펠릿의 구성성분

구분	중량비(%)
C	44 ~ 51
H	5 ~ 7
O	41 ~ 50
N	0.1 ~ 0.6
S	0 ~ 0.2
Ash	~ 2
고위 발열량	4500 kcal/kg

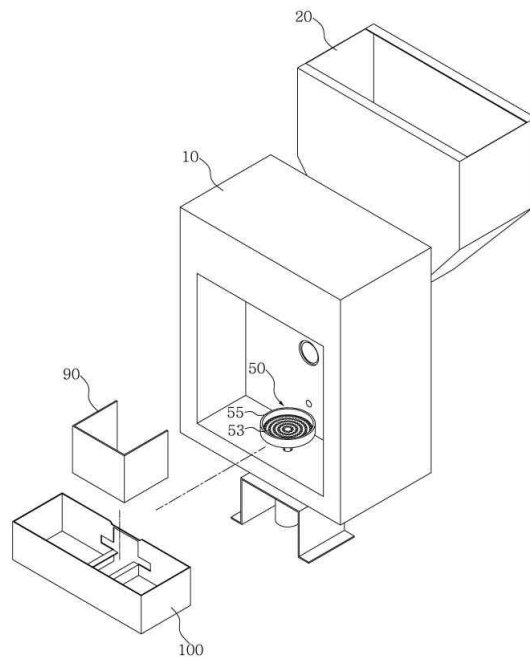
목재펠릿의 주성분은 <표 1>과 같이 목재와 같은 탄소, 수소, 산소, 질소로 구성되어 있으며 황과 염소 등이 미량 포함되어 있고, 비연소 성분인 회분이 최고 약 2% 포함되어 있다. 연소가스 중 수증기의 잠열까지 포함한 총발열량인 고위발열량(Higher Heating Value,

HHV)은 약 4500 kcal/kg으로 1kg당 경우 약 0.5리터와 같은 열량을 가지고 있으며, 밀도는 약 0.5~0.7g/cm³으로 수송과 보관이 비교적 용이한 고체연료이다(Eriksson et al(2011)), (김성호 외(2011)).

2.2 펠릿 보일러

펠릿보일러는 펠릿을 저장 및 공급하는 연료공급 장치, 공급된 연료를 연소시키는 연소장치, 연소 가스로부터 열을 회수하여 온수나 온풍을 발생시키는 열교환장치 및 연소에 의해 발생한 재를 처리하는 재처리장치 등으로 구성된다. <그림 2>와 <그림 3>은 각각 본 연구에서 개발된 펠릿 보일러 사시도와 분해단면도이며, 부품별 내용은 다음과 같다.

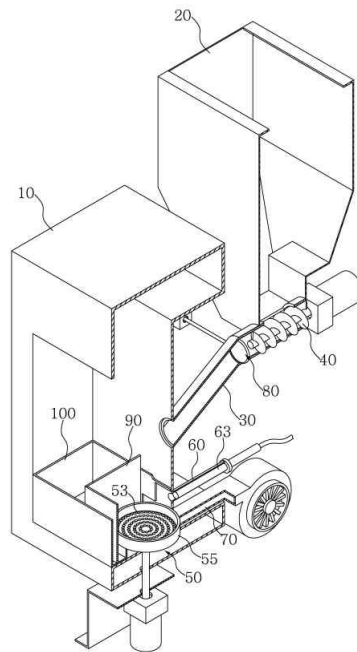
펠릿 보일러 본체(10)의 상측에는 본체와 연계되어 펠릿이 저장되도록 호퍼 형태인 저장호퍼(20)가 구성되며, 저장호퍼에 저장된 펠릿이 하측으로 자동으로 포집되도록 저장호퍼의 하부면은 하부 중앙으로 경사지도록 형성된다. 저장호퍼의 하측으로는 저장된 펠릿을 본체내부로 이송하는 이송관(30)이 구성되며, 이송관은 저장호퍼의 하부에 평행하게 연장되고 연장되는 단부로는 하측으로 경사져 본체의 내부와 연결되도록 연장되는 형태로 이루어진다.



<그림 2> 펠릿 보일러 사시도

즉 저장호퍼에 저장된 펠릿이 저장호퍼 하측에 형성된 이송관에서 이송된 후 하측으로 경사진 이송관 형태에 의해 하강되어 본체 내부로 이송이 이루어질 수 있도록 구성되는 것이다.

저장호퍼의 하측에 형성된 이송관측의 내부로는 저장호퍼에서 이송관으로 포집된 펠릿을 이송시킬 수 있도록 통상의 스크류콘베어로 구성되는 이송스크류(40)가 구성된다. 또한 본체의 내부 하측에서는 이송관에 의해 공급되는 펠릿의 연소가 이루어지는 연소판(50)이 구성되고 연소판은 펠릿이 안착되면서도 동력의 의해 회전되는 원판의 형태로 이루어진다. 원판으로 이루어진 연소판의 표면으로는 타공(53)이 다수 형성되어 펠릿의 연소에 필요한 공기가 연소판으로 유입될 수 있도록 하고 연소판의 외측으로는 상측으로 돌출되는 단턱(55)이 형성되어 연소판에 안착된 펠릿의 이탈을 방지하도록 한다.

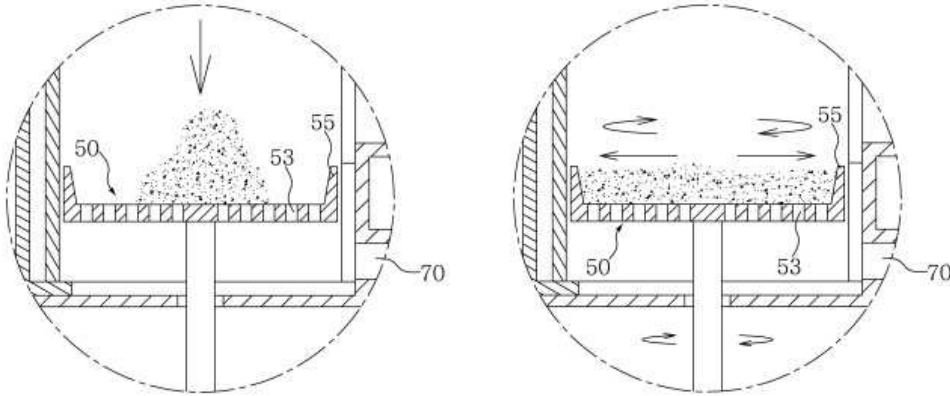


<그림 3> 펠릿 보일러 분해단면도

그리고 연소판에 안착된 펠릿의 연소가 이루어지도록 펠릿을 점화하는 점화관(60)이 구성되고, 점화관은 연소판이 형성되는 본체의 내측에 형성되는 관의 형태로 이루어져 점화관의 내부에서 히터봉 또는 가스점화기로 이루어지는 점화체(63)가 돌출 또는 인입될 수 있도록 구성되어 펠릿을 연소할 때에는 점화체가 돌출되고 펠릿의 연소가 일어나지 않을 때에는 점화체가 점화관의 내부로 인입되도록 한다. 본체의 점화관 하측 위치에는 외부에서 점화체에 의해 펠릿의 연소에 필요한 공기가 유입될 수 있도록 관의 형태로 구성되는 유입관(70)이 구성된다. 여기서 이송관의 중단으로 이송관으로 펠릿의 연소에 인해 발생하는 불길을 차단하는 역화방지수단(80)이 구성된다. 연소판의 외측으로 연소판을 수용하는 수용관(90)이 형성되고, 수용관의 외측으로 본체(10) 하측 내부에 끼움되는 끼움관(100)이 형성되어 수용관과 끼움관으로 하여금 이송관에 의해 자유낙하한 펠릿이 연소판에 안착될 때 펠릿이 연소판 외부로 이탈되는 것을 방지하고 연소가 완료된 펠릿의 회분이 외부로 분산되는 것을 방지하도록 한다.

2.3 열효율과 안전성을 고려한 부품 설계

기존의 소형 펠릿 보일러는 대부분 펠릿이 연소하는 화격자형 연소판의 하부에 뚫려있는 구멍을 통하여 공기를 주입하는 송풍 방식의 고정화격자형 버너로 되어 있다. 연료공급은 스크류 연료피더 방식을 채택하고 있어서 연료공급 스크류가 고온에 노출되어 불꽃의 역류 현상으로 인한 화재위험이 높고, 일정 기간이 경과하면 연료투입 스크류에 펠릿 가루가 퇴적되는 현상이 발생하여 연료공급이 제대로 되지 않는 등 고장이 잦고, 스크류에 펠릿이 파괴되어 상당량이 분말형태로 버너에 공급되므로 하부에서 주입되는 공기에 의해 쉽게 부양되어 분산되므로 발화 불쏘시게 역할과 불완전 연소 및 재발생의 원인이 되고 있다. 또한, 1, 2급이 아닌 저급연료를 사용하거나 장시간 가동 시 클링커 및 회분에 의한 공기공급로 차단 현상이 발생하고, 공급되는 펠릿이 연료공급관 부근에만 불균일하게 쌓이는 현상이 발생하여 연소효율 저하되며, 고정화격자형으로 회분 및 클링커가 적절하게 버너 아래로 떨어지지 않고 쌓이는 현상이 발생한다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 저장호퍼와 버너 사이의 거리를 최소화할 수 있도록 근접시켜서 버너에 펠릿을 공급하는 스크류의 길이를 최소화하였으며, <그림 4>와 같이 버너의 연소판이 움직이는 회전원판도가니형 버너를 개발하였다. 버너의 연소판이 일정한 시간간격으로 회전함으로써 공급되는 펠릿이 연료공급관 부근에만 불균일하게 쌓이는 현상을 제거하였다.

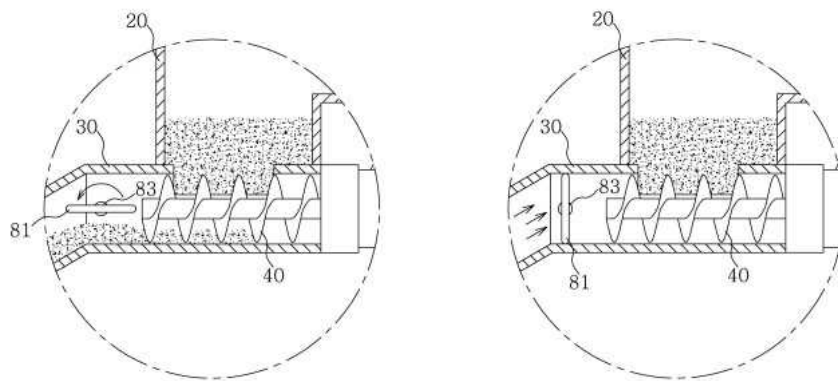


<그림 4> 회전원판도가니형 버너

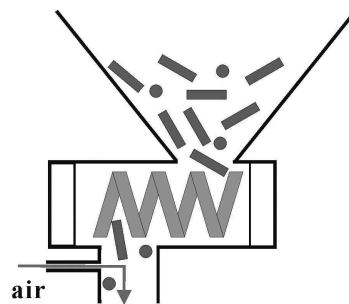
<그림 4>에 도시된 바와 같이 연소판(50)은 회전이 이루어지고 있는 상태로서 연소판으로 낙하하는 펠릿은 연소판 표면으로 고르게 안착되어 펠릿의 연소가 용이하게 이루어지면서도 연소효율을 높일 수 있도록 한다.

역화방지를 위하여 <그림 5>에 도시된 바와 같이 펠릿 이송관(30) 내부에 이송관을 차단할 수 있는 차단판(81)을 설치하였다. 차단판(81)은 동력모터의 회동에 의해 이송관을 차단된 상태로 회동되어 펠릿의 연소에 의해 발생하는 불길 및 연소열이 이송관으로 역화되는 것을 차단한다.

펠릿의 연소가 완료되면 저장호퍼에 저장된 새로운 펠릿을 연소관으로 공급하기 위해 동력 모터를 구동하여 차단관을 회동시켜 이송관을 개방된 상태로 유지시켜주어 상기의 과정을 다시 수행하게 된다. 추가적인 안전성을 확보하기 위하여 <그림 6>에 도시된 바와 같이 공기에 의한 역화방지 연료공급장치를 개발하였다. 이송관이 차단된 상태 상태에서 버너방향으로 공기를 송풍하여 화염이 이송관으로 주입되는 것을 방지하는 이중역화방지 장치를 도입하였다. 역화방지를 위하여 공급되는 공기는 2차공기의 역할도 수행한다.



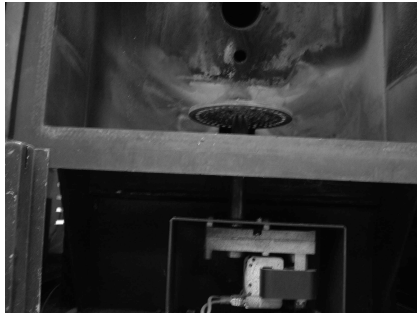
<그림 5> 개폐식 역화방지 장치



<그림 6> 공기주입에 의한 역화방지 연료공급장치

3. 성능 시험

<그림 7>과 같이 회전원판식 버너를 장착한 시험용 펠릿보일러를 제작하고, 이에 대한 성능 시험을 수행하였다. 목재펠릿의 발열량을 계산하기 위하여 원소분석기를 이용하여 연료로 사용한 목재펠릿에 대한 원소분석을 수행하였으며 펠릿의 조성은 <표 2>와 같다. 수분측정 결과 함수율은 10.3%였으며 아래의 식 (1)과 (2)를 이용하여 발열량을 계산하면 고위발열량 H_H 는 17.05MJ/kg이고 저위발열량 H_L 은 15.65MJ.kg이다.



a) 연소관



a) 회전원판 화격자 버너



c) 펠릿 저장 호퍼



d) 착화

<그림 7> 펠릿 보일러 시제품

<표 2> 연료펠릿의 구성요소

원소	탄소(C)	수소(H)	질소(N)	산소(O)	유황(S)	회분(Ash)	수분(Water)
함량(%)	47.89	5.03	0.07	35.71	0.0	1.0	10.3

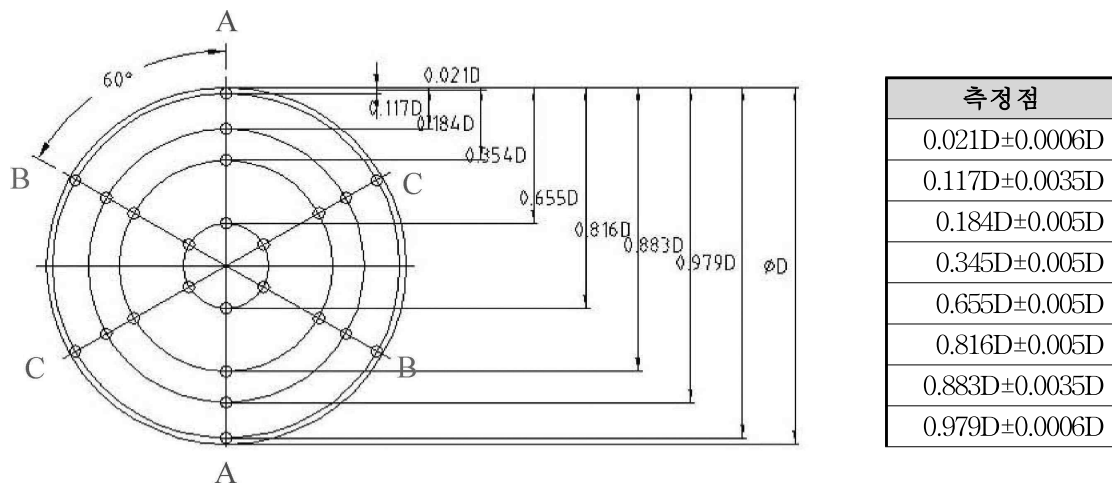
$$H_H = 8,100C + 34,000(H - O/8) + 2,500S \quad (1)$$

$$H_L = H_H - 600(9H + W) \quad (2)$$

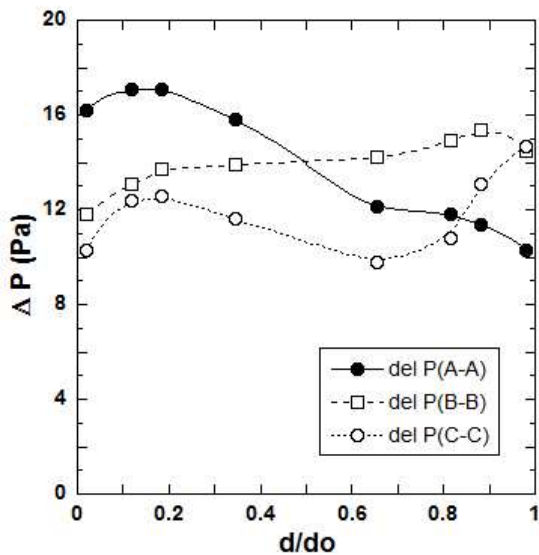
풍량계산을 위한 평균동압을 측정하기 위하여 온풍토출구에 KS B 6311에서 정한 송풍시험 장치를 설치하고 압력 및 풍속을 측정하였다. <그림 8>은 시험관로 단면의 측정점을 나타낸다. Dwyer Pitot tube를 장착한 Greenline MK2 가스분석기를 이용하여 배기가스의 온도, 속도 및 압력을 측정하였으며, <그림 9>와 <그림 10>은 각각 시험관로의 수평면으로부터 각이 각각 0°(A-A), 60°(B-B) 및 120°(C-C)인 면에서 측정한 압력과 풍속을 나타낸다. 농업용 고체연료 난방기 시험방법(NAAS T 7082(2008))에 따른 평균압력과 평균풍속을 계산하기 위하여 온풍

토출구 시작지점으로부터 축방향으로 시험관로 직경(D)의 8.5D~8.75D인 지점에서 <그림 8>의 각 측정점의 압력 및 풍속을 구하여 그 평균값으로 압력 및 풍량을 산출하였다. <표 3>은 아래의 식 (3)으로 계산된 평균동압 및 산술평균 풍속을 나타낸다.

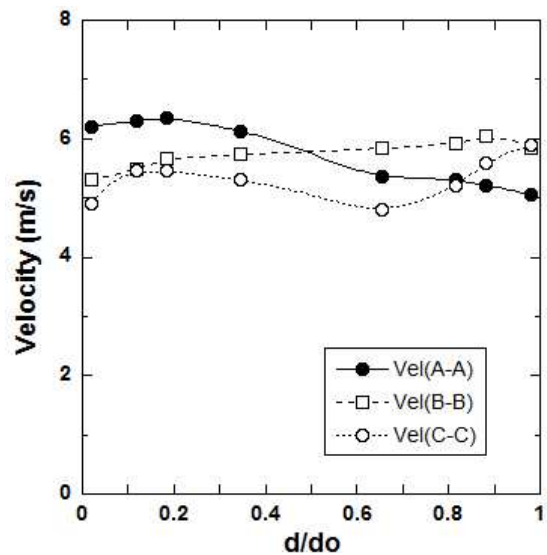
$$P_v = \left(\frac{\sum_{i=1}^{24} \sqrt{P_{vi}}}{24} \right)^2 \quad (3)$$



<그림 8> 시험관로 단면의 측정점



<그림 9> 시험관 내의 압력 분포



<그림 10> 시험관 내의 속도 분포

여기서 P_{vi} 는 각 측정점에서의 측정동압(Pa)이다. 토출공기의 풍속은 아래의 식 (4)로 계산할 수 있으며

$$V = \sqrt{\frac{2P_v}{\rho}} \tag{4}$$

시험관로내 공기밀도(kg/m³) ρ 는 식 (5)와 같다.

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{t_{d0} + 273.2}{t_d + 273.2} \right) \left(\frac{P_s + p_b}{p_b} \right) \tag{5}$$

<표 3> 평균동압 및 풍속

위치 (D/Do)	DP (Pa)			속도 (m/s)		
	A-A	B-B	C-C	A-A	B-B	C-C
0.021	16.2	11.8	10.3	6.21	5.30	4.90
0.117	17.1	13.1	12.3	6.30	5.49	5.45
0.184	17.1	13.7	12.6	6.36	5.57	5.45
0.345	15.8	13.9	11.6	6.13	5.73	5.30
0.655	12.1	14.2	9.8	5.37	5.84	4.80
0.816	11.8	14.9	10.8	5.30	5.92	5.20
0.883	11.4	15.4	13.1	5.22	6.04	5.60
0.979	10.3	14.5	14.7	5.05	5.84	5.90
평균	13.19			5.59		

$$Q = 3,600\rho AV C_p \frac{\sum_{i=1}^n (T_{2,i} - T_{1,i})}{1,000 n} \tag{6}$$

$$\eta_o = \frac{Q}{F \times H_H} \tag{7}$$

여기서 ρ_0 는 대기밀도, t_{d0} 는 대기 건구온도, t_d 는 풍량측정 단면에서의 건구온도, P_s 는 풍량측정 단면에서의 측정정압, p_b 는 대기압, p_p 는 증기의 분압, t_{wo} 는 대기 습구온도, R 은 기체상수, p_e 는 포화증기압이다. 시험 당시의 기상 조건과 측정 데이터는 아래 <표 4>와 같다. 이를 이용하여 포화증기압, 분압, 대기밀도, 시험관로 공기밀도, 토출공기 풍속, 토출구 풍량을 계산하면 <표 5>와 같다. 따라서 식 (6)과 (7)로 주어지는 정격난방능력 Q 는 54.48MJ/h이고, 저위 발열량 기준 효율 $\eta_{o,L}$ 와 고위발열량 기준 효율 $\eta_{o,H}$ 은 각각 97.2%와 89.2%이다.

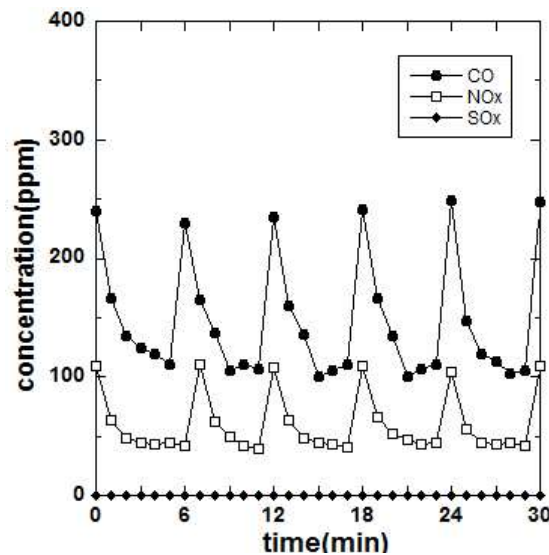
<그림 11>은 정상 운전상태에서 시간에 따른 배기가스 중 CO, NOx 및 SOx의 농도를 나타낸 그림이다. 정상 운전상태에서 배기가스의 배출 온도는 약 220℃였다. 배기가스 중 CO와 NOx는 연료투입 초기에 상승 후 연소가 진행됨에 따라 감소하였다. CO 농도는 연료투입 초기에 240~250ppm 까지 상승 후 약 100ppm으로 감소하였으며 평균농도는 약 143ppm으로 기준치 이하였다. NOx 농도는 연료투입 초기에 100~110ppm 까지 상승 후 약 45ppm으로 감소하였으며 평균농도는 약 58ppm으로 기준치 이하였다. 배기가스 중 SOx는 검출되지 않았다. 이는 연료펠릿의 조성에서 알 수 있듯이 황성분이 포함되어있지 않기 때문이다.

<표 4> 기상 조건과 측정 데이터

대기온도	상대습도	대기압	습구온도	토출 공기온도
24℃	12%	1,007hPa	10.2℃	79.5℃

<표 5> 토출구 풍량

포화증기압	분압	대기밀도	시험관로 공기밀도	토출공기 풍속	토출구 풍량
1,219.9Pa	293.5Pa	1.1793 kg/m ³	0.9937 kg/m ³	5.15 m/s	15.17 m ³ /min



<그림 11> 배기가스 중 CO, NOx 및 SOx 농도

4. 결론

현재 시중에 보급되고 있는 펠릿 보일러는 불완전연소, 과량의 재발생, 연료공급라인을 통한 역화에 의한 화재 위험, 슬래그에 의한 막힘 등으로 인한 고장문제, 불꽃의 강·약을 송풍으로 조절함에 따른 연료과다투입 등의 여러 가지 문제점이 있다.

본 연구에서는 기존 고정화격자식 버너를 개선한 회전원판식 연소버너와 회분식 연료공급 장치를 이용하여 효율이 높고 재 발생이 적은 소형 친환경 펠릿보일러를 개발하였다. 특히 안전성을 개선에 역점을 두어 연료공급라인을 차단하는 개폐식 역화방지 장치와 공기차단막을 이용한 2중 역화방지기술을 개발하여 역화의 위험을 완전하게 차단한 펠릿 보일러를 개발하였다. 개발된 펠릿보일러 성능실험을 통하여 저위 및 고위발열량기준 열효율이 각각 97.2%와 89.2%로 계산되었다. 배기가스중 CO와 NO_x 평균농도는 각각 143ppm과 58ppm으로 기준치 이하였으며 SO_x는 검출되지 않았다.

재 발생이 적으며 역화에 의한 화재위험이 없는 소형 고효율 난방용 펠릿 보일러가 성공적으로 개발되어 정부에서 강력히 추진하고 녹색성장 저탄소 신재생에너지사업에 일조할 수 있게 된 것으로 판단된다. 추후 확보된 기초기술을 토대로 300,000~3,000,000Kcal급 중대형 펠릿보일러 개발연구를 수행할 예정이며, 관련업체와의 기술 협의를 통하여 추가적인 신뢰성과 내구성 향상 방안에 대한 연구를 지속적으로 수행할 예정이다.

참고문헌

- [1] 산림청(2009), 목재펠릿의 에너지 활용대책.
- [2] McKendry, P.(2002), Energy production from biomass (part 1): overview of biomass, *Bioresource Technology*, Vol. 83, 37-46.
- [3] 한규성(2010), 목재펠릿의 이용실태 분석 및 안정적 공급방안, (사)한국펠릿연료협회.
- [4] Eriksson, G.L., Boman, C., Bergsten, U., and Bergstorm, D.(2011), "Fuel Characterization of Pellet Chips," *Forest Products Journal*, Vol. 61, 143-148.
- [5] 김성호, 김철환, 안병일, 이지영, Momin, Md., Yeasmin, S. 박현진, 광혜정, 김경철(2011), 숲가꾸기 산물을 이용한 펠릿의 원료 적성 연구, 2011년 한국 펄프종이 공학회 춘계학술 발표논문집, 171-178.
- [6] NAAS T 7082(2008), 농업용 고체연료 난방기, 농촌진흥청.
- [7] KS B 6311(1982), 송풍기의 시험 및 검사방법.