

안전성이 높은 산업용 목재펠릿 보일러 개발

정찬홍*·박민철*·이성영**

대구대학교*·(주)쌍마기계**

Development of Industrial Wood Pellet Boiler with High Safety

Chan Hong Chung*·Min Cheol Park*·Seong Young Lee**

Daegu University*·Ssangma Machine, Co., Ltd.**

Abstract

Recently, due to the high rise of energy costs and environmental problem issues, much attention has been paid to wood pellets. Wood pellets are produced by compressing woody biomass into cylindrical form. Wood pellets are suitable for use at various scales in 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 two industrial wood pellet boilers with high safety having capacities of 290kW and 440kW. Efficiency has been improved by using a rotating screw bar grate burner. Special attention has been paid to the improvement of the safety of the wood pellet boilers from backfire by adopting a triple protecting system composed of a rotary feeder, an air curtain, and a backfire protecting DC-fan.

Keywords : Wood Pellet(목재펠릿), Pellet Boiler(펠릿 보일러), Safety(안전성), Backfire Protection(역화방지)

1. 서론

최근 정부는 풍력, 태양에너지, 바이오매스 등 신·재생에너지 보급·확대를 위한 다양한 정책을 시행하고 있으며, 2030년까지 1차 에너지 중 신·재생에너지 비중을 11%까지 확대하는 정책을 수립하여 추진하고 있다(국가에너지위원회(2008)).

신·재생에너지 중 폐기물 에너지 다음으로 큰 비중을 차지하고 있는 바이오에너지 중 대표적인 연료의 하나인 목재펠릿은 목재 부산물을 톱밥형태로 파쇄한 후 고온 고압에서 목재가 가지고 있는 자체성분인 리그닌이 접착제 역할을 하도록 하여 펠릿 형태로 압축성형한 것이다. 목재펠릿은 1979년 탄생한 이후 1982년 스웨덴에 세계최초의 Pellet공장이 설립되었으며, 최근에는 원유가격의 급등현상으로 인하여 유럽 및 북미는 물론이고 세계 여러 곳에서 급속하게 확대되고 있다. 우리나라의 경우 2009년 이후 정부의 의욕적인 보급정책 실시에 따라 농·산촌을 중심으로 가정용 목재 펠릿 보일러 보급이 서서히 확대되고 있으며, 최근에는 수입 목재펠릿 가격의 하향 안정화 추세와 유가급등으로 인한 지속적인 경쟁력 향상으로 산업용 펠릿 보일러 수요가 급격히 늘어나고 있는 실정이다.

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

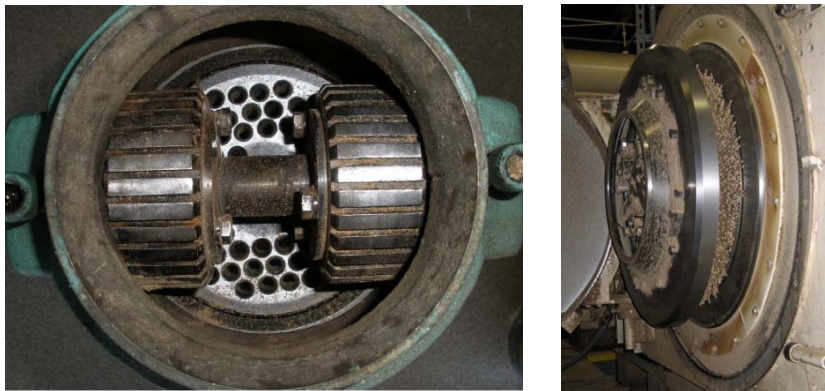
펠릿 보일러는 목재펠릿을 연료로 사용하는 대표적 제품으로, 가정에서 주로 사용되고 있는 20kW ~ 120kW급의 소형과 에너지 수요가 큰 원예 및 산업용 중대형 보일러로 나눌 수 있다. 현재 국내에서 목재펠릿 보일러 이용 중에 발생하는 소비자 불만족의 대부분은 목재펠릿의 품질보다는 연소기의 기술 수준 낙후 및 안전성 문제로 인한 불만족이 급증하고 있는 추세로, 목재펠릿 보일러 수요 확대에 걸림돌로 작용하고 있는 실정이다. 펠릿 보일러는 대부분 펠릿이 연소하는 버너의 하부에 뚫려있는 구멍을 통하여 공기를 주입하는 송풍 방식의 화격자형 버너로 되어 있고 연료공급은 스크류 연료피더 방식을 채택하고 있어, 일정 시간이 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 역화에 의한 화재위험이 높아 안전성에 문제가 있는 등의 단점이 있다.

본 연구의 목적은 기존 펠릿 보일러의 단점을 보완한 구조가 간편하고 사용이 편리하며 안전성이 높은 고효율의 중형 산업용 펠릿 보일러를 개발하는 것이다. 특히 다단계의 역화방지 장치를 개발함으로써 역화에 의한 화재위험이 없는 안전한 산업용 펠릿 보일러를 개발하는 것이다. 이를 위하여 고효율의 회전나선화격자 연소버너를 개발하고, 또한 리볼버식 격벽 장치를 이용한 연료공급장치, 공기차단막 및 역화방지 DC휀 등으로 구성된 3중 역화방지 시스템을 개발하였다.

경산시 압량면에 소재한 (주)쌍마기계에서 회전나선화격자 연소버너와 3중 역화방지 시스템을 결합한 290kW 및 440kW급 산업용 중형 목재펠릿 보일러 시제품을 제작·시험하였다. 열효율은 모두 85% 이상이며, 배기가스 중 NOx와 CO는 정격 운전상태에서 각각 100ppm 및 150ppm 이하로 기준치를 만족하였다.



<그림 1> 목재펠릿



<그림 2> 목재펠릿 성형기

2. 펠릿 보일러

2.1 목재 펠릿

고유가 시대의 도래와 온실가스 배출로 인한 지구온난화가 심각한 문제로 대두됨에 따라 화석연료를 대체할 수 있는 신재생에너지 개발의 중요성이 점증하고 있다(McKendry(2002)). 목재펠릿은 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 하도록 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)). 상대적으로 높은 에너지 밀도, 이용의 편리성, 경제성, 환경적으로 깨끗한 에너지원 등 수요와 공급의 양 측면에서 모두 장점을 지닌 목재펠릿은 전 세계적으로 사용이 증가하고 있는 실정이다(안병준 외(2011)).

제조공정은 사용한 목질계 원료의 특성에 따라 결정되나 일반적으로 건조, 분쇄, 성형 및 포장 등의 공정으로 구성된다. <그림 2>는 목재펠릿 성형기의 내부와 펠릿이 성형되어 압출되는 모습이다(Forests for Maines Ffuture(2012)).

건조는 펠릿 생산에 있어 필수적인 공정이다. 수분함량이 적은 일부 원료는 별도의 건조공정이 필요하지 않으나 대부분의 원료는 건조가 필수적이다. 건조과정에는 많은 에너지가 필요하며, 이를 통하여 진발열량이 증가한다. 목재섬유는 수분함량이 17% 이하에서 펠릿화가 가능하나 최적상태는 12% 이하이다. 건조 후 돌이나 금속 같은 이물질 제거한 원료는 너무 미세하게 분쇄할 경우 섬유 자체가 손상되어 펠릿 성형 공정에서 원활한 성형이 이루어지지 않기 때문에 적절한 크기로 분쇄되어야 한다. 건조와 분쇄를 마친 원료는 압출기 원리를 이용한 펠릿성형기에서 고온·고압의 상태에서 리그닌이 연화되어 펠릿의 형태로 성형된다. 압출성형된 펠릿은 공기 중에서 서서히 냉각되며 리그닌 성분이 펠릿을 응고시키고 강화시킨다(안병준 외(2011)).

최근에는 수입 목재펠릿 가격의 하향 안정화 추세와 유가급등으로 인한 지속적인 경쟁력 향상으로 산업용 펠릿 보일러 수요가 급격히 늘어나고 있는 실정이다. <표 1>의 목재펠릿의 경제성 비교에서 볼 수 있듯이 2012년 11월 현재 목재펠릿 100을 기준으로 상대가격을 비교하면 면세경유 154, 도시가스 128로 산업용 목재펠릿의 경우 여타 신재생에너지(태양열, 태양광 조력, 지열 등)의 경우와 달리 정부의 적극적인 보조정책 없이도 충분한 경쟁력을 보유한 신재생에너지이다.

<표 1> 목재펠릿의 경제성 비교(2012년 11월 기준)

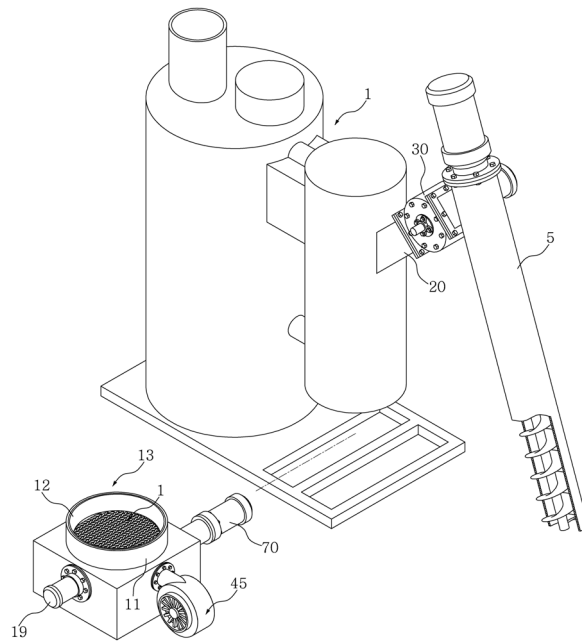
구분	목재펠릿	경유	면세경유	등유	도시가스
가격	280원/kg	1,649.4원/ℓ	859.4원/ℓ	1,179.7원/ℓ	833.2원/Nm ³
발열량	4.5Mcal/kg	9Mcal/ℓ	9Mcal/ℓ	9Mcal/ℓ	10.5Mcal/Nm ³
동일발열량(Mcal)당 가격	62.2원	183.3원	95.5원	131.1원	79.4원
상대가격	100	295	154	211	128
비교	수입산 대리점 가격	대리점 가격		대리점 가격	산업용 경기지방

목재펠릿의 주성분은 목재와 같이 탄소 44 ~ 51%, 수소 5 ~ 7%, 산소 41 ~ 50%, 질소 0.1 ~ 0.6%로 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)이 약 4500 kcal/kg으로 1kg당 경유 약 0.5리터와 같은 열량

을 가지고 있으며, 밀도는 약 $0.5 \sim 0.7 \text{ g/cm}^3$ 으로 수송과 보관이 비교적 용이한 고체연료이다(Eriksson et al(2011), 김성호 외(2011)).

2.2 펠릿 보일러

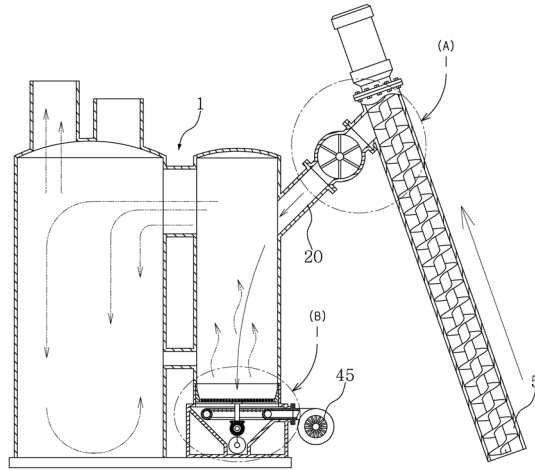
목재펠릿의 연소는 건조, 탈휘발화(devolatilization), 가스화, char 연소 및 가스상 산화 등으로 이어지는 과정으로, 산소공급이 불충분할 경우 일산화탄소, 검댕(미분된 탄소), 타르 및 미연소탄화수소(UHC)가 생성된다. 열효율을 높이고, 불완전 연소과정의 산물로 발생되는 각종 오염물질 배출수준을 낮추기 위해서는 가스연소과정에서 최대한 연소가 이루어져야만 한다. 한편, NO_x 배출량은 연료의 질소함량이 높을수록, 그리고 연소 시 산소 농도가 높을수록 증가하게 된다. 펠릿 보일러는 펠릿을 저장 및 공급하는 연료공급 장치, 공급된 연료를 연소시키는 연소장치, 연소 가스로부터 열을 회수하여 온수나 스팀 또는 온풍을 발생시키는 열교환장치 및 연소에 의해 발생한 재를 처리하는 재처리장치 등으로 구성된다.



<그림 3> 펠릿 보일러 사시도

본 연구에서 개발한 산업용 펠릿 보일러의 버너시스템은 화격자 연소시스템이다. <그림 3>과 <그림 4>는 각각 본 연구에서 개발한 펠릿 보일러 사시도와 단면도이며, 부품별 내용은 다음과 같다. 펠릿 보일러는 <그림 3>의 펠릿 보일러 사시도 및 <그림 4>의 펠릿 보일러 단면도와 같이 펠릿의 연소에 의해 연소열이 발생되어 동력원이 공급되는 하우징(1)과, 스크류 콘베어를 이용하여 외부에서 하우징(1)으로 펠릿을 이송하는 펠릿투입장치(5), 리볼버식

격벽장치를 이용한 연료공급 겸 역화방지장치(A), 펠릿투입장치로부터 공급되는 펠릿이 낙하하여 히터봉 또는 가스점화기 등으로 이루어지는 점화장치에 의하여 펠릿의 연소가 이루어지는 회전나선화격자 버너(B)로 구성된다.

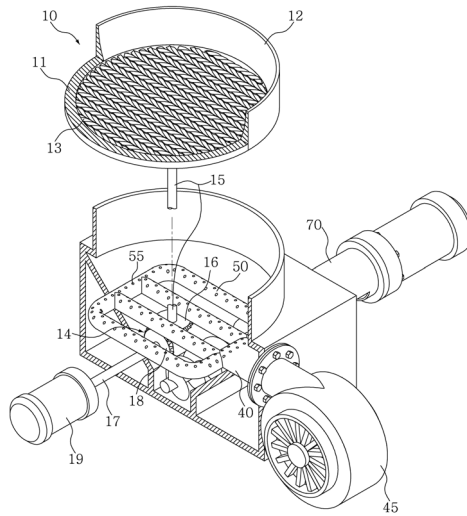


<그림 4> 펠릿 보일러 단면도

2.3 열효율과 안전성을 고려한 부품 설계

기존의 펠릿 보일러는 대부분 펠릿이 연소하는 화격자형 연소판의 하부에 뚫려있는 구멍을 통하여 공기를 주입하는 송풍 방식인 고정화격자형 버너를 사용하고 있다. 연료공급은 단순한 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, 펠릿이 스크류를 통과하며 분쇄되어 상당량이 분말형태로 버너에 공급되므로 하부에서 주입되는 공기에 의해 쉽게 부양되고 분산되어 발화 불쏘시게 역할과 불완전 연소 및 재발생의 원인이 되고 있다. 본 연구에서는 이러한 단점을 개선하기 위하여 회전나선화격자 버너를 개발하였다. <그림 5>는 회전나선화격자 펠릿버너 분해단면도이다. 펠릿의 연소가 이루어지는 회전나선화격자 버너의 자세한 형태는 원형의 링으로 이루어지는 본체(11)와 펠릿이 외부로 이탈되는 것을 방지하는 단턱(12)으로 구성된다. 연소판(10)은 나선방향으로 비틀림되는 방향이 상호 대응되는 여러 쌍의 봉으로 이루어져 본체에 평행하게 설치되는 나선화격자로 구성되며 동력모터(19)는 연소판을 회전시킨다.

연소판의 회전은 펠릿이 나선화격자에 고르게 안착되도록 하여, 연소판에 적층된 상태에서 미연소 상태로 연소되는 현상을 방지하여 펠릿의 연소효율을 높인다. 또한 나선형봉의 경사면을 따라 연소된 재가 자동으로 낙하되어 회분의 포집이 용이하여 사용이 편리하며 연소판의 막힘현상이 방지되는 효과를 가지게 된다. <그림 6>은 회전나선화격자 펠릿버너 시제품이다.

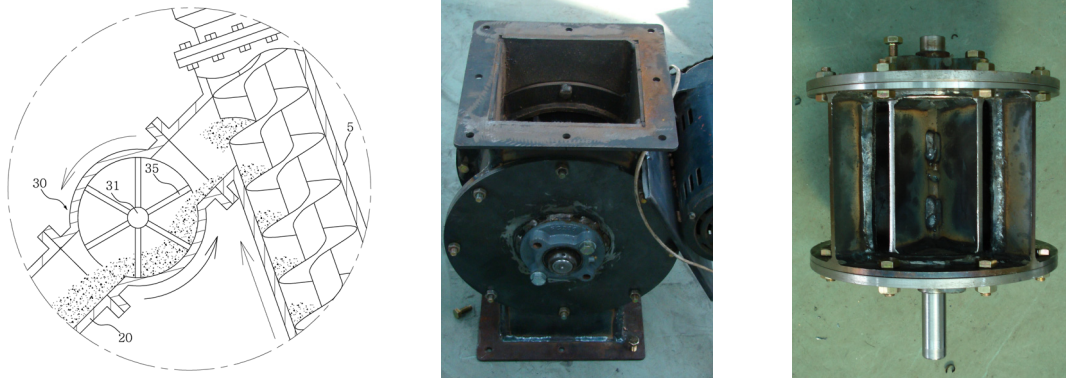


<그림 5> 회전나선회격자 펠릿버너 분해단면도



<그림 6> 회전나선회격자 펠릿버너 시제품

기존 펠릿 보일러의 연료 공급 방식은 단순 스크류식 구조로 이루어져 역화 방지가 불안정하다. 본 연구에서는 (1) 리볼버형의 격실구조로된 연료공급장치에 의한 1차 역화방지, (2) 연료투입구에 에어커튼에 의한 2차 역화방지, (3) 정전 시 작동하는 DC 역화환에 의한 3차 역화방지의 3가지 방법에 의한 3중 역화방지 장치를 설치하여 완벽한 역화방지가 될 수 있도록 하였다.



<그림 7> 리볼버식 격벽장치를 이용한 역화방지 겸 연료공급장치



<그림 8> 연료투입구의 에어커튼에 의한 2차 역화방지를 위한 송풍기

추가적인 안전성을 확보하기 위하여 <그림 7>과 같은 리볼버식 격벽장치를 이용한 역화방지 연료공급장치를 개발하였다. 리볼버식 격벽장치를 이용한 역화방지 연료공급장치는 펠릿이 자유낙하도록 하측방향으로 경사진 투입구와, 모터에 의하여 회전가능한 회전축(31), 회전축과 일체로 이격되는 판의 형태로 구성되는 회전판(33), 회전판의 중앙을 중심으로 내부를 다수의 구획으로 구분하며 역화방지 역할을 하는 리볼버형 격벽으로 구성된다.

2단계 역화방지를 위하여 <그림 8>과 같이 공기 송풍을 위한 송풍기를 설치하였다. 이송관이 차단된 상태 상태에서 버너방향으로 공기를 송풍하여 에어커튼을 형성하여 화염이 이송관으로 주입되는 것을 방지하는 이중역화방지 장치를 도입하였다. 역화방지를 위하여 송풍되는 공기는 2차공기의 역할도 동시에 수행한다.

3단계 역화방지를 위하여 <그림 9>와 같이 정전 시 작동하는 DC 역화철크를 설치하였다. 이 DC 역화철크는 갑작스런 정전 시 내장 배터리로 구동되는 DC 철크로, 화염이 연료투입구로 역화되는 것을 방지한다. 또한, 연료투입구 부분에 과열방지기를 부착하여 공급되는 펠릿의 온도가 85℃ 이상으로 상승 시 경보알림과 동시에 모든 작동이 중지되고 역화철크만이 작동하도록 하였다.



<그림 9> 정전 시 작동하는 DC 역회전에 의한 3차 역회방지



290kW급



440kW급

<그림 10> 펠릿 보일러 시제품

3. 성능 시험

경산시에 소재한 펠릿 보일러 제조업체인 (주)쌍마기계에서 <그림 10>과 같이 회전나선화격자 펠릿버너를 장착한 290kW급과 440kW급 시험용 펠릿 보일러를 제작하고, 이에 대한 성능시험을 수행하였다. 목재펠릿의 발열량을 계산하기 위하여 원소분석기를 이용하여 연료로 사용한 산림조합중앙회의 목재펠릿에 대한 원소분석을 수행하였으며 펠릿의 조성은 <표 2>

와 같다. 펠릿의 고위발열량은 구성 원소가 산소와 반응하여 완전연소 되었다고 가정하여 구할 수 있으며, 저위발열량 또는 진발열량은 고위발열량에서 수증기로 배출되는 열량을 뺀 실제 이용가능한 발열량이다. 고위발열량(H_H)과 저위발열량(H_L)은 다음 식으로 계산될 수 있다. 여기서 C, H, O, S, W 는 각각 탄소, 수소, 산소, 황 및 수분의 중량분율이다. 이를 이용하여 발열량을 계산하면 고위발열량은 4,782kcal/kg(20.08MJ/kg)이고 저위발열량은 4,367kcal/kg (18.34MJ/kg)이다.

<표 2> 연료펠릿의 구성요소

원소	탄소(C)	수소(H)	질소(N)	산소(O)	유황(S)	회분(Ash)	수분(Water)
함량(%)	48.95	6.53	0.07	33.02	0.0	1.11	10.32

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

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

이론공기량(A_0)은 펠릿 구성 원소를 산소와 반응하여 완전연소 시킨다고 가정할 때에 필요한 최소 공기량으로 다음 식으로 계산된다. 본 연구에서 사용한 목재펠릿의 경우 이론 공기량은 $4.81 \text{ m}^3/\text{kg}$ 이다.

$$A_0 = 8.89C + 26.7(H - O/8) + 33.3S \quad (3)$$

과잉공기비가 m 일 때에 실제공기량은 $A = mA_0 (\text{m}^3/\text{kg})$ 이다. 이때의 가스발생량은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} CO_2 &= 1.867C \\ O_2 &= 0.21(m-1)A_0 \\ N_2 &= 0.8N + 0.79mA_0 \\ H_2O &= 11.2H + 1.24W \\ SO_2 &= 0.7S \end{aligned} \quad (4)$$

배출가스의 정압비열 C_p 는 가스 구성성분의 주어진 온도에서의 정압비열과 분율을 곱한 합으로 구할 수 있으며, 과잉공기비 $m = 1.8$ 배출가스의 온도가 150°C 인 경우 위의 배출가스의 정압비열은 $C_p = 0.332$ 다. 과잉공기비 $m = 1.8$ 인 경우 펠릿 1kg당 배출가스량은 $G = 9.71 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ 이며, 배출가스의 온도가 $t = 150^\circ\text{C}$ 인 경우 배출가스에 의한 열손실 열량은 $Q_E = C_p G t = 484 \text{ kcal/kg}$ 이다. 펠릿 1kg당 발생한 재의 양이 $m_r = 0.021 \text{ kg}$ 이고 재의 발열

량이 $H_{LA} = 2,220$ 인 경우 재 미연소 손실은 $Q_R = m_r H_{LA} = 46.6 \text{ kcal/kg}$ 이다. 배기가스 중 일산화탄소에 의한 탄소의 불완전연소에 의한 열손실(Q_{CO})은 다음 식과 같다.

$$Q_{CO} = \frac{2,561 CO}{CO_2 + CO} (C - m_r C_A) \quad (5)$$

여기서 C_A 는 재속의 탄소분율이다. 배기가스 중 CO 의 농도가 150 ppm 이고 $C_A = 23\%$ 인 경우 $Q_{CO} = 1.98 \text{ kcal/kg}$ 이다. 연소효율(η_b)은 가용 열량 중 미연소펠릿에 의한 손실(재 미연소 손실)과 탄소의 불완전 연소(일산화탄소)에 의한 손실을 제외한 열량의 분율로 다음 식과 같다.

$$\eta_b = 1 - \frac{m_r H_{LA} + Q_{CO}}{H_L} \quad (6)$$

재 발생량이 투입펠릿 1 kg 당 $m_r = 0.021 \text{ kg}$ 이고, 과잉공기비가 $m = 1.8$, 배기가스 중 CO 의 농도가 150 ppm 인 경우 연소효율은 98.8% 이다. 최고 열효율(η_{\max})은 가용 열량 중 미연소펠릿에 의한 손실(재 미연소 손실), 탄소의 불완전 연소(일산화탄소)에 의한 손실 및 배기가스에 의한 손실을 제외한 열량의 분율이며, 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{Q_E + Q_R + Q_{CO}}{H_L} \quad (7)$$

온수보일러의 경우 난방능력 Q 는 공급된 가용열량 중 회수된 열량 즉 온수의 온도를 높이는 데 사용된 열량이며, 아래 식과 같이 구할 수 있다.

$$Q = G_w C_P \frac{\sum_{i=1}^n (T_{2,i} - T_{1,i})}{1,000 n} \quad (8)$$

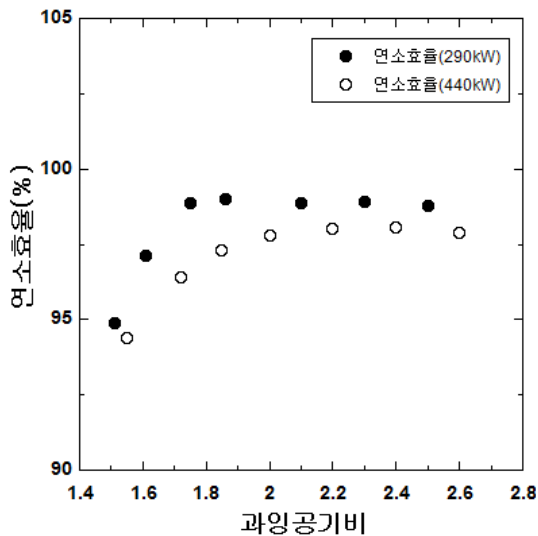
여기서 Q 는 난방능력(kcal/hr), G_w 는 급수량(kg/hr), $T_{1,i}$ 는 입구에서 물의 온도, $T_{2,i}$ 는 출구에서 물의 온도, n 은 측정회수이다. 급수량 $G_w = 4.85 \text{ m}^3/\text{hr}$, 입구에서 물의 온도 $T_{1,i} = 22.8^\circ \text{C}$, 출구에서 물의 온도 $T_{2,i} = 73.7^\circ \text{C}$ 인 경우 난방능력은 $Q = 1,040 \text{ MJ/h}$ 이다. 이 경우 온수보일러의 열효율(η)은 아래 식과같이 구할 수 있다.

$$\eta = \frac{100 Q}{F H_L} \quad (9)$$

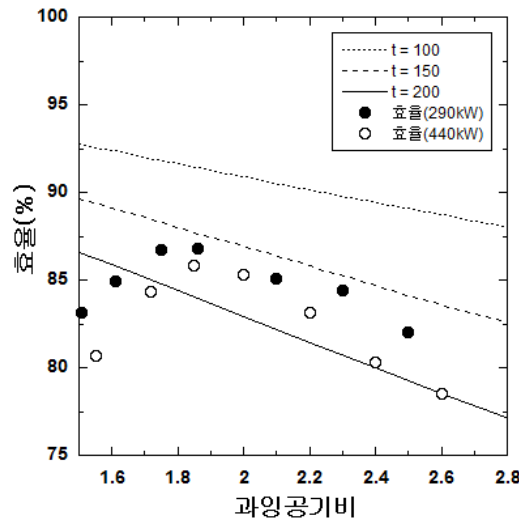
여기서 F 는 연료소비량(kg/hr)이다. 저위발열량이 $H_L = 18.34MJ/kg$ 인 펠릿의 시간 당 소비량이 $F = 63.6kg/hr$ 인 경우 보일러의 열효율은 89.2%이다.

<그림 11>은 290kW(25만 $kcal/hr$)와 440kW(38만 $kcal/hr$) 용량의 펠릿 보일러 시제품의 경우 정격 운전조건에서 과잉공기비의 변화에 따른 연소효율이다. 그림에서 볼 수 있듯이 290kW급 펠릿 보일러 시제품의 연소효율이 더 높으며, 과잉공기비가 약 2 이상이면 연소효율이 97% 이상이고, 큰 변화가 없음을 보여준다. 과잉공기비가 증가하면 배기가스 중 산소농도가 증가하며, 일정 수준 이상의 과잉공기 조건에서는 연소에 필요한 충분한 산소가 공급되므로 연소효율에 변화가 없음을 알 수 있다. 시제품 보일러의 경우 과잉공기비가 약 1.8 ~ 2 이하이면 연소에 필요한 충분한 산소가 펠릿에 균일하게 공급되지 아니하여 미연소 펠릿과 일산화탄소가 증가하였으며 이로 인하여 연소효율이 급격히 감소하였다.

<그림 12>는 온수 펠릿 보일러 시제품의 정격 운전조건에서 과잉공기비 변화에 따른 열효율이다. 그림에서 실선, 파선, 점선은 배기가스 온도가 각각 $200^{\circ}C$, $150^{\circ}C$, $100^{\circ}C$ 인 경우 과잉공기비가 $m = 1.0 \sim m = 3.0$ 까지 변화할 때의 이론 최고열효율이다. 보일러 시험 운전 시 배기가스의 온도는 $140^{\circ}C \sim 150^{\circ}C$ 였으며, 실험결과와 이론 최고열효율 사이의 차이는 보일러에서의 열손실과 미연소 펠릿 및 일산화탄소 증가에 따른 손실의 차이로부터 기인한다.

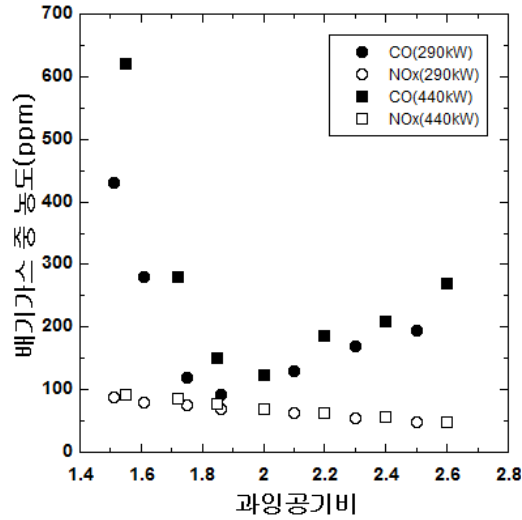


<그림 11> 펠릿 보일러 연소효율



<그림 12> 펠릿 보일러의 열효율

<그림 11>과 <그림 12>에서 볼 수 있듯이 290kW급 펠릿 보일러 시제품의 열효율이 더 높으며, 과잉공기비가 약 1.8 ~ 2에서 열효율이 최고값을 보였다. 그러나 과잉공기비가 약 2 이상이면 배기가스에 의한 열손실 증대로, 과잉공기비가 약 1.8 이하이면 미연소 펠릿과 일산화탄소의 증가로 열효율이 85% 이하로 감소하였다. 이러한 시제품 운전시험 결과에 따라 산소센서를 사용하여 과잉공기비가 약 1.8 ~ 2(배기가스의 산소농도 9% ~ 10%)에 접근하도록 풍량을 조절하였다.



<그림 13> 과잉공기비의 변화에 따른 배기가스 중 CO 및 NOx의 변화

배기가스를 분석은 Greenline MK2 가스분석기를 이용하였다. <그림 13>은 과잉공기비의 변화에 따른 배기가스 중 CO 및 NOx의 변화를 나타낸다. 정상 운전상태에서 배기가스의 배출 온도는 약 140℃ ~ 150℃ 였다. 배기가스 중 NOx는 시험운전 조건에서 100ppm이하로 목표값인 150ppm 이하를 보였으며, 배기가스 중 산소농도가 증가할수록 약간 감소하였다. CO 농도는 과잉공기비에 매우 민감하게 변화하였으며, 과잉공기비가 약 1.8 ~ 2일 때에 최저값을 나타내었다. 배기가스 중 SOx는 검출되지 않았다. 이는 연료펠릿의 조성에서 알 수 있듯이 황성분이 거의 포함되어있지 않기 때문이다.

4. 결론

현재 시중에 보급되고 있는 펠릿 보일러는 불완전연소, 과량의 재발생, 슬래그에 의한 막힘 등으로 인한 고장문제, 불꽃의 강·약을 송풍으로 조절함에 따른 연료과다투입 등의 여러 가지 문제점이 있으며, 특히 연료공급라인을 통한 역화에 의한 화재 위험으로 보일러의 안전성이 매우 취약한 실정이다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 극복하기 위하여 기존 고정화격자식 버너를 개선한 진탕나선격자형 연소버너를 이용하여 효율이 높은 290kW(25만kcal/hr)와 440kW(38만kcal/hr)급 산업용 중형 목재펠릿 보일러를 개발하였다. 특히 리볼버형의 격실구조로된 연료공급장치에 의한 1차 역화방지, 연료투입구에 에어커튼에 의한 2차 역화방지, 정전 시 작동하는 DC 역화철회에 의한 3중 역화방지 장치를 개발하여 보일러의 안전성을 높일 수 있도록 하였다.

개발된 펠릿 보일러의 열효율은 성능실험을 통하여 정상 운전 조건에서 85% 이상으로 측정되었으며, 정상 운전 조건에서 배기가스 중 CO와 NOx 농도는 각각 200ppm과 100ppm 이

하였으며 SO_x는 검출되지 않았다.

역화에 의한 화재위험이 없는 안전성이 높은 290kW와 440kW급 산업용 펠릿 보일러가 성공적으로 개발되어 정부에서 강력히 추진하고 녹색성장 저탄소 신재생에너지사업에 일조할 수 있게 된 것으로 판단된다. 추후 확보된 기초기술을 토대로 3,500kW급 중대형 펠릿 보일러 개발연구를 수행할 예정이며, 관련업체와의 기술 협의를 통하여 추가적인 신뢰성과 내구성 향상 방안에 대한 연구를 지속적으로 수행할 예정이다.

참고문헌

- [1] 국가에너지위원회(2008), 제1차 국가에너지기본계획.
- [2] 김성호, 김철환, 안병일, 이지영, Momin, Md., Yeasmin, S. 박현진, 곽혜정, 김경철 (2011), 숲가꾸기 산물을 이용한 펠릿의 원료 적성 연구, 2011년 한국 펄프종이 공학회 춘계학술발표논문집, 171-178.
- [3] 산림청(2009), 목재펠릿의 에너지 활용대책.
- [4] 안병준, 이수민, 최돈하, 이오규, 최석환, 김용식(2011), 국가별 목재펠릿 정책 및 유럽의 시장동향, 국립산림과학원.
- [5] 한규성(2010), 목재펠릿의 이용실태 분석 및 안정적 공급방안, (사)한국펠릿연료협회.
- [6] Eriksson, G.L., Boman, C., Bergsten, U., and Bergstorm, D.(2011), "Fuel Characterization of Pellet Chips," *Forest Products Journal*, Vol. 61, 143-148.
- [7] Forests for Maines Ffuture(2012), <http://www.forestsformainesfuture.org/fresh-from-the-woods-journal/wood-pellets.html>.
- [8] McKendry, P.(2002), Energy production from biomass (part 1): overview of biomass, *Bioresource Technology*, Vol. 83, 37-46.