

폐목 톱밥 연료의 저NOx MILD연소

*심 성훈¹⁾

Low NOx MILD Combustion for Sawdust Fuel

*Sunghoon Shim

Key words : Biomass fuel, NOx, MILD combustion

Abstract : MILD combustion has been successfully applied to gaseous fuels and few commercial systems are now in operation. Extending MILD combustion applicability to solid fuel of sawdust is the focus of the present work. The MILD combustion furnace at the University of Adelaide in Australia was used in this study. A measurement of O₂ and CO emissions have been carried out in parallel with consideration of NOx emission and compared in each modes of conventional natural gas combustion, natural gas MILD combustion, NOx emission in natural gas MILD combustion mode can be reduced to 20% in comparison with conventional combustion. Emission in cases of air carrying sawdust combustion and CO₂ carrying sawdust combustion were also compared. Air and CO₂ were used as a carry gas for the sawdust. It was found that MILD conditions are possible for sawdust particles of less than 355 μm without additional air pre-heating. It was also found that when using CO₂ as the carry gas the flame inside the furnace was not visible anymore and that NOx emission dropped to less than two folds.

1. 서론

석유계 연료의 생산이 최고점에 가까워짐에 따라 수요대비 공급부족현상은 전세계적인 에너지 대란이 이미 폭전에 이르렀음을 예고한다. 이제 인류는 문명의 퇴화를 막기 위해서 새로운 에너지원을 찾아야 한다. 그러나 완전한 대체에너지원이 출현하기 전까지는 사용가능한 잔존 연료를 최대한 효율을 높이고 환경오염물질의 배출을 극소화하는 방향으로 사용하여야 한다. 바이오매스, 석탄, 폐기물 등의 고체연료가 그 중의 하나로 될 수 있으나, 일반적으로 고체연료의 연소 시에는 NOx, CO 등의 환경오염물질이 기체나 액체 연료에 비해 많이 배출된다. 특히 NOx의 배출은 산성 강우, 광화학적 스모그 등의 형태로 환경적 피해가 크게 나타나기 때문에 이의 배출을 저감하는 것은 매우 중요하다. 이미 생성된 NOx는 SCR과 같은 촉매를 이용한 후처리장치로 분해하는데 설비비와 유지비용이 매우 높으므로 연소과정에서의 NOx발생을 최대한 저감하고자 하는 노력이 지속되고 있다. 이러한 저NOx 연소방법 중의 하나가 MILD (Moderate and Intense Low oxygen Dilution) 연소방법이다⁽¹⁾. 이 연소방식은 열과 배가스를 동시에 재순환하여 연소에 이용하는 방식으로 이는 연구자에 따라 HiTAC (High Temperature Air Combustion), FLOX (Flameless Oxidation)라

고도 명명한다. MILD연소는 대체로 기체연료와 이보다는 다소 드물지만 액체연료에 대해서도 NOx 저감효과에 대하여 주로 연구가 이루어 졌으며⁽²⁻⁵⁾ 고체연료에 적용한 사례는 극소수에 불과하다. Orsino 등은 미분탄연료에 MILD연소를 적용하여 고체연료에서도 NOx저감의 가능성을 설명한 바 있으며⁽⁶⁾, Suda등 역시 석탄에 대하여 원통형의 연소로에서 공기예열에 의하여 40%의 NOx를 저감시킬 수 있는 것으로 발표하였다⁽⁷⁾. 본 연구에서는 가스연료와 고체연료인 톱밥연료에 대하여 기존연소와 MILD연소를 적용시켜 NOx저감효과를 비교함으로써 고체연료에 대한 MILD연소의 활용 가능성을 조사하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 MILD 연소로

MILD연소로는 기체연료와 고체연료를 동시에 사용할 수 있도록 다음의 Fig. 1과 같이 구성되어 있다. 내화재로 시공된 연소로의 중앙부에는

1) 한국기계연구원
E-mail : shshim@kimm.re.kr
Tel : (042)868-7349 Fax : (042)868-7284

로의 예열을 위한 기체연료(천연가스)를 공급하기 위한 연료노즐과 그 주위로 산화제인 공기를 예열하여 공급하는 공기노즐이 설치되어 있다.

이는 가동의 초기에 천연가스와 공기의 확산 화염으로 약 1시간 동안 로의 상부온도가 1,000°C 이상으로 예열시키기 위함이다. 즉 초기연소는 확산연소방식으로 NO_x의 배출이 기존의 일반연소와 차이가 없다. 로가 충분히 예열되면 중앙부에서의 공기공급을 차단하고 연료만 분사한다. 이때 연소를 위한 공기는 로 주변에 배치된 4개의 2차공기노즐을 통해 공급한다. 연소로의 배기구에는 중앙부의 연료노즐과 주변의 공기노즐 사이에 위치한다. 이렇게 함으로써 상승된 연료와 공기는 연소로 상부 천장에서 부딪히면서 방향을 전환하여 배기구 쪽으로 유동하면서 전단층에서 혼합되면서 MILD연소모드로 전환되는 것이다. 여기에서 연소과정에서 발생한 배가스가 연소장에 확산하면서 재순환효과를 발생시킨다. 즉 본 MILD연소로에서는 초기 예열된 로벽의 열과 배가스를 동시에 재순환시키면서 연소가 이루어지게 하는 것이다. 본 방식의 MILD연소모드에서는 공기를 더 이상 예열하지 않는다. 연소로 내부의 높이는 585mm, 단면은 280mm×280mm이다.

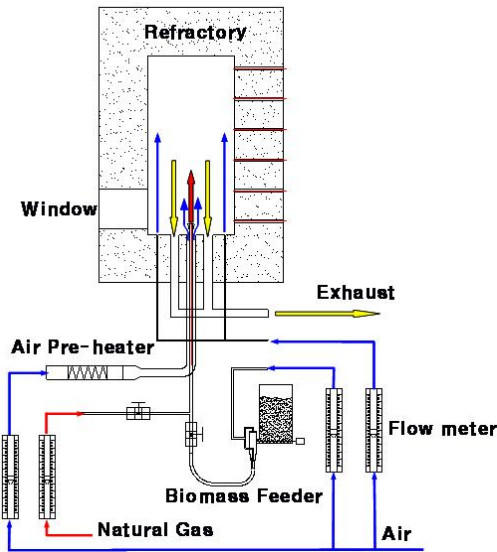


Fig. 1 Schematic of MILD combustion Furnace

2.2 Biomass 연료

본 실험에서는 기체연료의 MILD연소와 비교하기 위하여 고체연료로써 바이오매스인 톱밥을 이용하였다. 톱밥은 제재소에서 일부 자연건조된 상태의 것으로 수분 함량은 최대 약 7%이었다. 수분은 건조한 후에 밀링기를 이용하여 분쇄한 후에 체진동기(sieve shaker)를 이용하여 이송이 곤란한 큰 입자를 분리해 내었다. 사용된 톱밥연료의 입자는 평균입경이 106 μm 이하이다. 톱밥의 조성을 분석한 결과는 Table 1과 같다. 이 톱밥은 정량공급을 위해서 상업용 커피자판기에 사용하는 자동공급기의 모터 회전수를 조절할 수 있도록 하여 기체를 이용한 이젝터를 제작하여 천

연가스를 공급하는 기체연료 노즐을 통해 분사될 수 있도록 하였다. 노즐의 내경은 7.3mm이다. 톱밥의 공급을 위한 기체는 공기와 이산화탄소를 이용하였다. 다음의 Fig.2에 톱밥이 분사되는 형태를 촬영한 사진을 게재하였다.

Table 1. Analysis of sawdust (wt%)

C	H	O*	N	S	W	Ash	LHV**
50.40	6.05	40.5	0.22	0.02	1.98	0.83	4,330

*Balance, **kcal/kg



Fig. 2 Sawdust injection

3. 실험결과 및 고찰

3.1 화염의 변화 양상

Fig. 4에 개재된 사진은 각 연소모드에서 나타나는 대표적인 화염 형태를 촬영한 것이다. Fig. 4-(a)는 연소로의 예열을 위하여 중앙부의 노즐에서 분사되는 연료와 노즐의 주위에서 동축류로 공급되는 공기가 형성하는 확산화염의 형태를 보여준다. 초기 로의 내부가 예열되지 않았을 때에는 보다 선명한 형태의 확산화염을 보여주지만 사진에서와 같이 로 내부의 온도가 1,000°C를 상회하게 되면 가스 확산화염에서 나타나는 청염이 완전히 사라지고 노즐 출구부에서 복사광이 강한 황염이 나타나며 하류로 가면서 화염이 아주 얇아지고 있다. 즉 하류에서의 확산화염은 상당히 높은 온도로 예열된 공기와 연료가 혼합되어 형성되는 화염으로 무화염연소의 특징을 부분적으로 형성하는 것으로 보인다.

Fig. 4-(b)는 중앙부의 노즐에서는 공기를 차단하고 연료만 분사하는 상태로 연소용의 공기는 로 외곽부의 4개의 2차 공기노즐에서만 분사되도록 하였을 때의 사진이다. 사진에서 보는 바와 같이 연소로 내부에서 가시화염은 완전히 사라지고 보이지 않으며 무화염상태를 나타내고 있다. 로의 내부가 가열된 상태에서 로의 외곽으로 분사된 공기는 상승과정에서 연료의 착화온도 이상

으로 급격히 예열되고 중앙부에서 분사된 연료는로의 천장에서 유동 방향을 바꾸면서 하향 유동하면서 역시 하부로 유동하는 공기와 전단층(shear layer)에서 혼합되면서 착화되어 연소된다. 이 과정에서 연소된 배가스의 일부는 연소장에 확산되면서 열과 배가스의 재순환이 이루어진 MILD연소의 형태로 전환된 것으로 판단할 수 있다. 일반적으로 MILD연소에서 사용되는 공기에 열기의 사용이 없어도 가시화염이 나타나지 않은 MILD연소의 구현이 가능한 것이다.

다음의 Fig. 4-(c)의 사진은 톱밥을 중앙의 노즐을 통해 공기를 이용하여 수송하면서 외곽의 2차공기와 함께 연소시킬 때의 화염사진이다. 이 사진에서는 중앙부의 노즐근처에서는 화염이 보이지 않으나 외곽의 로 내벽근처에서 가시화염이 나타나고 있다.

즉, 가스의 확산화염에서와 같이 연료와 함께 산화제인 공기를 분사한 경우에는 가시화염이 소멸되지 않고 존재하게 됨을 보여준다. 이 경우 중앙부의 노즐에서 화염이 형성되지 않는 것은 이 부분에서 분사된 톱밥연료가 착화온도에 도달하지 못하였고 동시에 고체연료의 경우에는 열에 의한 가스화과정이 수반되어야 하므로 착화가 지연되어 하부로 유동하면서 외벽부분에서 연소되는 것으로 볼 수 있다.

반면 Fig. 4-(d)에서 보는 바와 같이 톱밥을 이산화탄소 가스로 수송하였을 경우에는 천연가스의 MILD연소모드에서와 같이 가시화염이 사라짐을 확인할 수 있다. 이는 이산화탄소로 톱밥을 수송하는 경우 수송가스 중에 산소가 없으므로 상승 중에 연소가 일어나지 않고 가열되면서 열분해 가스화가 먼저 일어나고 다시 가열된 연소용 공기와 혼합되면서 가스연료의 MILD연소와 같은 양상의 연소형태를 나타내는 것으로 판단된다. 여기에서는 이산화탄소의 열해리로 인한 화염온도의 저감효과도 수반될 것으로 예측된다.

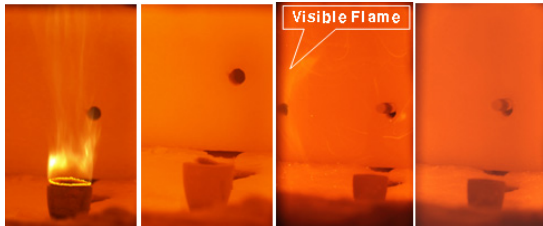


Fig. 3 Flames of each mode, (a)conventional NG, (b)MILD NG, (c)air-carrying sawdust, (d)CO₂-carrying sawdust

3.2 가스 분석 및 온도 측정 결과

다음의 그림 Fig. 4 및 Fig. 5는 각 연소모드의 변화에 따른 일산화탄소(CO)와 질소산화물(NOx)의 배출농도 변화를 도시한 것이다. 여기서 배기가스의 분석은 연소조건에 따른 급격한 변화에 측정센서가 손상되지 않도록 연속적으로 측정하지 않고 연소조건 변경 후에 안정된 상태에서 측정하여 그 결과를 조건별로 조합한 것이다.

Fig. 4에서 보면 CO의 농도는 기존 가스연료의

확산화염모드 (①)에서 약 45ppm으로 측정되었으며 이때의 잔류 산소농도는 2.6-3.5%의 범위에 있다. 연소모드를 MILD연소로 변경한 경우(②)에서는 CO의 배출농도가 48ppm에서 최대 630ppm까지 증가하고 있다. 이때의 산소농도는 4.5-6.3%의 범위이다.

영역 ① 및 ②의 당량비는 각각 0.71, 0.64이다. 이와 같이 MILD연소모드에서는 공기의 공급이 많아 산소의 농도가 높음에도 불구하고 CO의 농도가 높아지고 있는데 이는 기존의 연소모드에서는 산화제인 공기의 공급을 연료와 동축류로 공급하여 혼합이 잘 되는 반면 MILD연소모드에서는 중앙부 노즐에서 분사된 연료와 외곽부 4개의 노즐에서 분사된 공기류가 연소실의 천장에 부딪혀 다시 하강하면서 전단층에서 혼합되므로 아무래도 혼합성이 나빠진 때문으로 판단된다.

마찬가지로 톱밥연료를 이용한 Fig. 4의 영역 ③ 및 ④에서도 같은 현상을 볼 수 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 영역 ③은 톱밥을 공기를 이용하여 수송한 경우이며, 영역 ④는 이산화탄소를 이용하여 수송한 경우이다. 영역 ③ 및 ④의 당량비는 각각 0.71-0.80, 0.72이다. 그림에서 보는 바와 같이 톱밥연료를 공기로 수송한 영역 ③에서는 CO의 농도가 2-12ppm으로 매우 낮지만 이산화탄소로 수송한 영역 ④에서는 30ppm에서 순간 최대치 970ppm까지 높아진다.

이와 같은 CO의 심한 변화는 역시 연료와 공기의 혼합성에 기인하는 것으로 보인다. CO의 증가 문제는 본 연구에서와 같은 형태의 MILD연소로에서 해결되어야 할 하나의 과제이다.

Fig. 5에는 Fig. 4와 같은 조건에서 NOx의 배출농도를 측정된 결과를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 영역 ①에서는 NOx의 배출농도가 72-80ppm이었으나 영역 ②의 MILD연소모드에서는 16-24ppm으로 크게 감소한 것을 알 수 있다.

마찬가지로 공기수송의 톱밥연료를 이용한 영역 ③에서는 당량비를 0.71에서 0.80까지 조절함에 따라 NOx의 농도가 260ppm에서 160ppm까지 감소하였으며, 이후 영역 ④에서와 같이 이산화탄소 수송으로 전환함에 따라 70ppm에서 90ppm의 범위로 크게 낮아짐을 확인하였다.

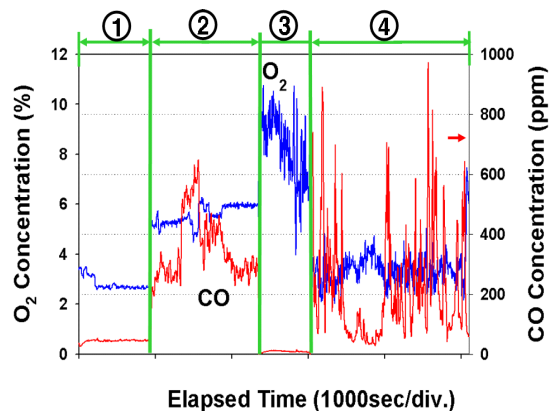


Fig. 4 O₂ and CO emissions in each combustion mode. (1)conventional NG, (2)MILD NG, (3)air-carrying sawdust, (4)CO₂-carrying sawdust.

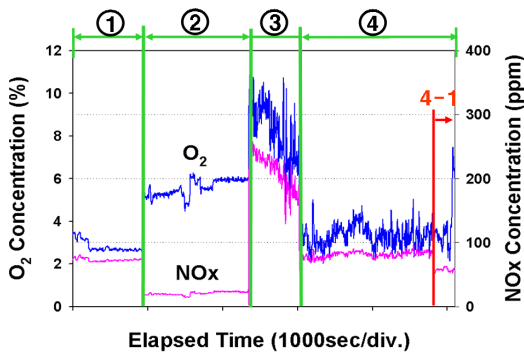


Fig. 5 O₂ and NO_x emissions in each combustion mode. (1)conventional NG, (2)MILD NG, (3)air-carrying sawdust, (4)CO₂-carrying sawdust.

Table 2. Operation conditions of Fig. 4 and Fig. 5

	1	2	3	4
Fuel	NG	NG	Sawdust	Sawdust
Thermal input(kW)	7.0	10.0	7.5	7.5
ϕ	0.71	0.64	0.71-0.80	0.72
Avg. jet vel. (m/s)	2.23	3.18	9.63-7.00	8.68

즉, 고체연료인 톱밥을 이산화탄소 가스를 이용하여 수송한 경우의 MILD연소모드에서도 NO_x의 생성농도를 상당량 줄일 수 있다는 것을 이 결과가 보여주고 있는 것이다. 여기서 보다 고무적인 것은 Fig. 5에서 4-1로 표시된 영역으로 톱밥연료의 입자가 106-355 μm 로 보다 큰 경우의 측정결과를 보여주는 것으로 NO_x의 농도가 58ppm까지로 감소한다. 이와 같은 측정결과에 대해서는 추후 보다 면밀히 검토되어야 할 부분이나, 고체연료에 있어서 입자의 크기가 큰 경우에도 MILD연소를 적용하여 NO_x의 생성농도를 줄일 수 있는 가능성을 보여주고 있다. Fig. 6은 연소로내 상하부 온도측정 결과를 비교 도시한 것으로 가스연료의 확산화염영역 ① 및 공기수송의 톱밥연료의 연소 ③의 기준연소모드에 비하여 가스연료의 MILD연소영역 ②에서의 상하부 온도차가 절반정

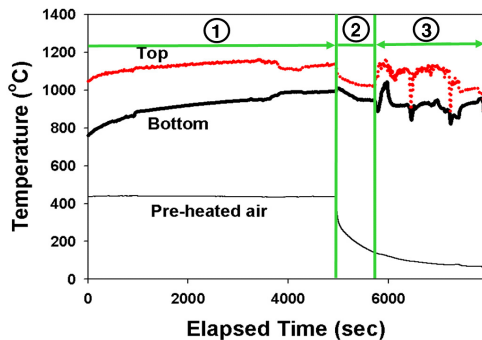


Fig. 6 Temperature profiles of top and bottom of furnace and pre-heated air. (1)conventional NG, (2)MILD NG, (3)air-carrying sawdust.

도로 감소 하였음을 보여준다. 즉, MILD연소 모드에서는 가시화염의 소멸로 인해 고온의 화염대에서 기인하는 온도편차가 감소함으로써 연소 온도차가 전반적으로 균일해 졌음을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 공기를 예열하지 않는 형태의 MILD연소로에서 가스연료와 고체연료인 톱밥연료를 연소시켜 MILD연소모드를 구현하여 기존 연소모드와 비교한 결과 가스연료에서는 NO_x를 최대 80% 까지, 톱밥연료의 경우에는 최대 56%까지 감소시킬 수 있었으며, 상대적으로 큰 입자의 경우에 더욱 NO_x저감 효과를 높일 수 있는 가능성을 확인하였다. 추후 NO_x의 저감효과와 더불어 CO의 증가를 동시에 억제할 수 있는 MILD연소를 구현할 수 있는 연구가 지속적으로 수행될 예정이다.

후기

본 연구는 한국기계연구원 해외연수프로그램의 일환으로 호주 아델레이드 대학에서 수행되었으며, 2007년 12월 개최된 "Proceedings of the Australian Combustion Symposium (Univ of Sydney)"에 발표한 내용을 번역하고 일부내용을 수정/재구성한 것입니다.

References

- [1] Cavaliere A., de Joannon, M., "MILD Combustion", Progress in Energy and Comb. Science, Vol.30, pp.329-366, 2004.
- [2] Tsuji, H., Gupta, A.K., Haskgawa, T., Katsuki, M., Kishimoto, K., and Morita, M., "High Temperature Air Combustion - From Energy Conservation to Pollution Reduction", CRC press, 2003.
- [3] Dally, B., A.N. Karpetsis, and R.S. Barlow, Proc. Combust. Inst. Vol. 29, pp. 1147-1154, 2002.
- [4] Szego, G., Dally B.B., Nathan, G.J., "Scaling of NO_x Emission from a laboratory Scale MILD Combustion Furnace Operating at Moderate temperatures", CNF, under review, August 2007.
- [5] Weber, R., Orsino, S., Verlaan, A.L., and Lallermant, N., Journal of the Inst. of Energy, Vol.74, pp 38-47, 2004.
- [6] Orsino, S., Tamura, M., Satbat, P., Constantini, S., Prado, O., and Weber, R., "Excess Enthalpy Combustion of Coal", IFRF Report, F46/y/3, 2000.
- [7] Toshiyuki Suda, Makoto Takafuji, Tetsuya Hirata, Motoki Yoshino, and Junichi Sato, Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 29, pp.503-509, 2002.