

MILD연소 적용을 통한 기체 및 고체연료의 질소산화물 저감

심 성 훈
한국기계연구원

Reduction of NO_x Emission by MILD Combustion of Gaseous and Solid Fuels

Sung Hoon Shim

Korea Institute of Machinery and Materials

1. 서론

공해저감측면에서의 혁신적인 연소기술인 MILD연소기술은 기존 연소에서 나타나는 많은 문제점을 해결해줄 수 있는 대안이 될 수 있다. 세계적으로 화석연료의 수요증가와 공급부족에 따른 에너지 비용의 증가와 공해문제로 인해 에너지 효율의 향상과 공해저감에 기술적 수요가 급증하고 있다. 연소기술에서의 에너지효율 향상과 공해저감방안으로 연소배가스의 재순환을 이용하여 공기를 고온으로 예열하며 동시에 연소과정에서의 공해물질 발생을 저감하는 기술이 많이 적용되고 있다. 고온의 예열공기를 사용하는 연소기술을 HiTAC(High Temperature Air Combustion)¹⁾이라 하며 많은 연료의 연소분야에 적용이 확산되고 있다. 그러나 예열공기의 온도만을 높여 연소시키게 되면 에너지 효율은 상승하지만 화염의 온도가 높아지게 됨에 따라 NO_x의 생성이 증가하게 됨이 2001년 M. Flamme²⁾의 연구를 통해 확인되었다. 기존의 연소방식에서는 예열공기의 온도를 300°C로만 올려도 예열하지 않은 경우보다 약 2배 정도 NO_x의 생성이 증가하며 예열공기온도가 600°C 이상이 되면 NO_x의 생성농도는 더욱 가파르게 증가하게 된다. 최근에 들어 이보다 효율적으로 열을 이용하고 동시에 NO_x를 저감하기 위하여 개발된 기술이 바로 MILD연소(Moderate and Intense Low oxygen Dilution)³⁾이다. MILD연소는 연구자에 따라 HiTAC(High Temperature Air Combustion), 또는 FLOX(Flameless Oxidation)연소로 부르기도 한다. Dally 등은 기체연료를 고온의 희석된 산화제 분위기 중으로 분사하고 레이저진단을 통해 MILD연소의 배출특성에 관한 자료를 발표한 바 있다.⁴⁾ 또한 Szegő 등은 별도의 공기에 열장치 없이 기체연료에 대하여 MILD연소의 구현이 가능함을 보여주었으며,^{5,6)} Weber 등은 경유와 증유에 대하여 이 연소방식을 적용한 바 있다.⁷⁾ 그러나 고체연료에 대하여 MILD연소를 적용한 연구는 찾아보기 힘들다. Orsino 등

은 석탄에 MILD연소를 적용하여 기체 및 액체연료와 동일한 수준의 열유속에서 기존연소에 비해 절반정도의 NO_x 저감이 가능함을 발표하였다.⁸⁾ 국내에서도 연소과정에서 발생하는 NO_x를 저감하려는 노력은 지속적으로 이루어져 왔다. 2000년에 양제복⁹⁾ 등은 연소용 공기를 고온으로 예열할 수 있는 축열버너의 연소특성이 MILD연소와 유사한 특성으로 보인다는 것을 실험을 통해 확인하였으며 연소조건에 따라 NO_x의 저감이 가능하다는 것을 보여주었다. 2002년에 박민철¹⁰⁾ 등은 고온의 예열공기를 액체연료의 분무연소에 적용하여 화염특성을 분석하고 NO_x가 15~20% 감소한다는 것을 실험적으로 확인하였으며, 2003년에 조은성¹¹⁾ 등은 대항류 확산화염에서 고온의 연소공기를 공급하였을 때의 연소특성을 수치해석으로 조사하여 고온의 연소공기와 낮은 산소농도를 유지한 경우의 NO_x의 발생 저감기구에 대하여 설명하였다. 같은 시기에 강민욱¹²⁾ 등은 역시 고온의 연소공기를 공급하는 자기축열식 연소에서 배가스 재순환이 연소특성에 미치는 영향을 조사하여 NO_x 저감의 가능성을 확인한 바 있다. 상기와 같이 최근에 들어 고온의 예열공기를 연소용공기로 사용하는 MILD연소기술에 대한 연구가 증가하고는 있으나 연료의 다양화 측면에서 볼 때에는 대부분이 가스연료에 국한되고 액체나 고체연료를 사용한 연구는 극히 드물다. 추후 석유계 연료의 고갈에 따라 열이용 효율이 상대적으로 낮고 공해배출량이 많은 석탄 및 폐기물이나 바이오매스 연료의 사용이 불가피할 경우를 대비하여 MILD기술을 다양한 연료에 적용할 수 있도록 기술 역량을 향상시키는 것이 매우 중요한 것으로 판단된다. 본 연구에서는 기체연료와 동시에 고체연료인 바이오매스에 대하여 MILD연소를 적용하여 배출특성으로 비교하고 별도의 공기에열장치를 사용하지 않고도 MILD연소의 구현이 가능한지를 조사하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1. MILD연소장치

E-mail: shshim@kimm.re.kr
Tel: 042-868-7349

Fax: 042-868-7284

실험실 규모로 설계 제작된 MILD연소장치의 사진을 Fig. 1에 게재하였다. MILD연소장치는 연소반응이 일어나는 MILD연소로와 하부의 연료 및 산화제 공급장치와 배기장치로 이루어져 있다. 연소로는 내화재로 시공되었으며 내부는 585 mm의 높이에 280×280 mm의 단면을 가진다. 정면에는 화염관측창이 후면에는 온도측정공이 배치되어 있다. 배기가스의 측정은 연들의 유입부에서 이루어진다. 연소로의 바닥면은 Fig. 2와 같이 배치되어 있다. 그림에서 보는 바와 같이 중앙에 동축으로 7.3 mm의 내경을 가진 연료노즐과 26.4 mm의 내경을 가진 1차공기 공기노즐이 배치되어 있으며, 외곽으로 4 mm 내경의 2차공기 공기노즐이 4개 배치되어 있다. 1차와 2차공기 노즐 사이에는 4개의 26.4 mm의 내경을 가진 배기관이 설치되어 있다. 착화를 위한 점화기는 중앙의 연료노즐에서 방전불꽃이 발생하도록 장치되어 있다.

초기에는 연소로의 예열을 위하여 중앙의 연료노즐을 통해 도시가스가 공급되고 동축 배치된 공기노즐을 통해 연

소용 1차공기가 400℃로 예열되어 공급된다. 1시간 정도의 예열을 통해 연소로 하부의 온도가 1,100℃에 도달하면 1차공기는 차단되고 연소로 주변의 4개의 2차공기 노즐을 통해 공기공급이 전환된다. 기체연료와 바이오매스의 고체연료는 중앙의 연료노즐을 통해 계속 공급된다. 연소로가 충분히 가열되어 있으므로 이때부터 연소용 공기는 예열하지 않는다. 로내의 축열에 의하여 연료의 MILD연소가 이루어진다. 온도는 R-type열전대를 이용하여 상부(바닥면에서 542.5 mm위치)와 하부(바닥면에서 42.5 mm)의 온도를 측정하였다. 배기가스는 연들의 입구부에서 TESTO 350 L 연소가스 분석기를 이용하여 O₂, CO 및 NO_x를 측정하였다.

2.2. 고체연료의 준비와 공급

기체연료는 앞에서 언급한 바와 같이 도시가스를 이용하였으나 배출특성 비교를 위한 고체연료는 중앙의 7.3 mm 노즐을 통해 정량 공급하는 것이 용이하지 않다. 본 연구에서는 바이오매스의 하나인 톱밥을 원료로 이를 밀링기계(milling machine)에서 분쇄한 후에 다시 체진동장치(sieve shaker)에서 큰 입자를 분리해 내어 공기, 이산화탄소 및 질소 등의 이송용 기체(carrier gas)를 이용하여 연료노즐을 통해 이송될 수 있도록 하였다. 원료톱밥은 평균 4.7~7.3%의 수분을 함유하고 있었으며 분쇄 전에 미리 건조하여 수분을 제거하여 체진동 과정에서 분리가 잘 이루어질 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 평균입경이 355 μm보다 작은 톱밥을 대상으로 실험하였다. 준비된 톱밥연료를 연소로에 정량공급하기 위하여서는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 상업용 커피자판기에 사용하는 커피공급기를 개조하여 이젝터와 조합하여 사용하였다. 공급량의 조절은 직류모터에 대하여 공급전압을 변화시켜서 하였으며 간혹 이젝터에서 막힘이 발생하였으나 대체로 ±3.4%의 정확도로 공급되었다. Fig. 3의 오른쪽 사진은 공기에 의해 이송되어 분사되는 톱밥의 형태를 촬영한 것으로 평균분사유속은 8.76 m/s이다. 여기서 톱밥의 부피는 이송기체부피의 0.5% 이하로 무시하였다. Table 1에 톱밥연료의 조성과 발열량을 분석한 결과를 게재하였다.



Fig. 1. MILD combustion furnace.

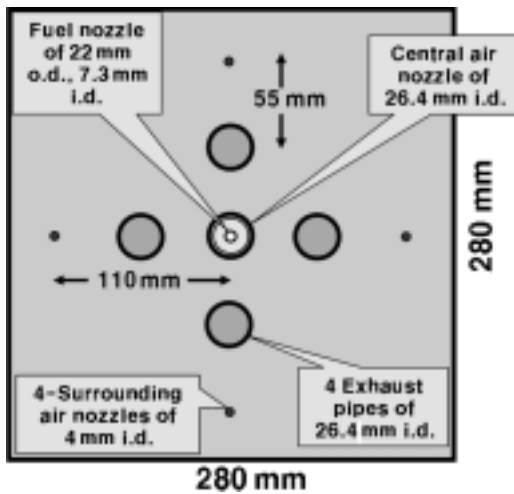


Fig. 2. Bottom arrangement.

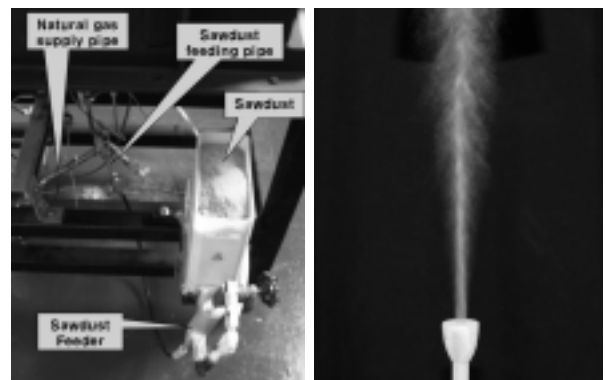


Fig. 3. Sawdust feeding arrangement and sawdust jet through the fuel nozzle.

Table 1. Analysis of sawdust(wt%)

| C | H | O* | N | S | W | Ash | LHV** |
|-------|------|-------|------|------|------|------|-------|
| 50.40 | 6.05 | 40.50 | 0.22 | 0.02 | 1.98 | 0.83 | 18.1 |

*Balance, **MJ/kg

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 가스연료의 연소모드 전환에 따른 배출 특성

다음의 Fig. 4은 도시가스에 대하여 종래의 연소방식인 동축류 확산화염의 연소모드에서 MILD연소로 전환한 경우의 연소가스 배출 특성을 측정된 결과이다. 초기 연소로의 예열과정은 그림의 가로축에서 60분되는 위치까지 수행되었으며 이때 가스연료량은 7.5 kW의 부하로 공급하였다. 연소 당량비 $\phi=0.71$ 로 일산화탄소(CO)의 농도가 거의 0이 되는 조건으로 시작하였다. 그림의 40분대에서는 연소로의 온도가 상승함에 따라 당량비를 조절하여 CO가 증가하지 않는 범위에서 공기공급량을 최소화하였다. 그림의 40분대에서 60분대 사이에는 당량비 $\phi=0.77$ 이며 CO의 배출농도는 거의 변하지 않았음을 알 수 있다. 공기량을 감소시킨 이유는 CO를 증가시키지 않은 최적의 당량비로 연소가스의 양을 최소화할 수 있는 연소조건에 맞추어 연소모드의 전환에 따른 차이를 비교하기 위함이다. 공기량의 감소에 따라 NOx의 농도도 감소하여 90 ppm에서 70 ppm으로 낮아졌음을 보여준다. 이는 최적의 공기량을 공급함으로써 연소배가스의 양을 줄임과 동시에 NOx의 생성농도도 상당량 낮출 수 있음을 보여주는 결과이다.

Fig. 4의 그래프에서 가로축이 60분대에서 중앙부 노즐의 예열공기공급을 차단하고 외부의 4개 2차 공기 노즐을 통해 공기를 공급함으로써 연소모드를 MILD연소로 전환하였다. 그림에서 보는 바와 같이 NOx의 배출농도가 70 ppm에서 23 ppm으로 연소모드가 MILD연소로 전환되는 순간 즉시 감소함을 확인할 수 있다. 즉, 가스연료의 연소에서는 기존의 연소방식에 대해 MILD연소에서 약 70%가 감소한 것이다. NOx의 생성은 주로 고온의 화염대에서 이루어지게 되는데 Fig. 5의 (a)에서 관찰되는 것처럼 기존의 확산화염에서 나타나는 화염대가 MILD연소로 전환되

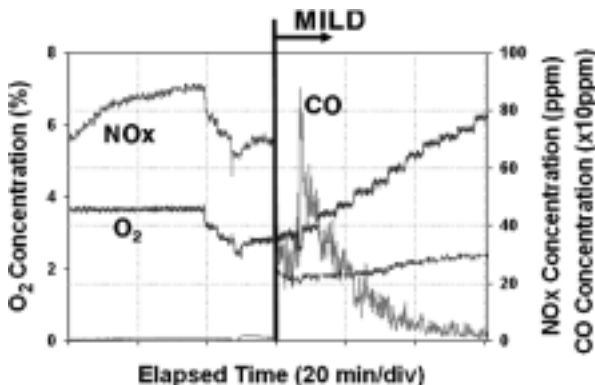


Fig. 4. O₂, CO and NO_x emission in each combustion mode of gaseous fuel.



Fig. 5. Flame photo of (a) diffusion, and (b) MILD combustion of gaseous fuel.

면 (b)에서와 같이 연료노즐에서 연료가 분사되고 있음에도 가시화염이 전혀 나타나지 않고 있다. 즉 고온의 화염대에서 반응하여 생성되는 NOx가 MILD연소에서 화염대가 없어짐으로 해서 NOx의 생성이 획기적으로 감소하게 되는 것으로 판단된다. MILD연소모드로 전환되는 순간 공기예열기의 운전은 중지되므로 본 연구의 연소로에서는 별도의 공기예열이 없어도 가시화염이 나타나지 않는 MILD연소를 구현하였다는 것에 큰 의미를 부여할 수 있다.

3.2. 고체연료의 연소모드 전환에 따른 배출 특성

고체연료의 MILD연소를 위해서는 가스의 경우와 마찬가지로 우선 도시가스의 연소열을 이용하여 로를 1시간 정도 예열한 다음에 준비된 톱밥연료를 중앙의 연료노즐을 통해 공급한다. 역시 공기는 주변의 노즐을 통해 공급한다. 먼저 톱밥 이송용 기체를 공기로 하여 공급하였을 경우가 Fig. 6의 전반부 약 22분의 측정결과이다. 여기서 톱밥의 연소 당량비 $\phi=0.80$ 이다. 그림에서 보는 바와 같이 NOx 배출농도는 115 ppm에서 120 ppm사이에 있음을 알 수 있다. 동시에 연소로 내부 주변부에 가시화염이 나타난다. 물론, 가스연료의 확산화염에서와 같은 뚜렷한 화염대는 보이지 않지만 가시화염의 존재는 공기 이송 경우의 톱밥연소는 MILD연소가 아닌 것으로 볼 수 있다.

여기서 다른 조건을 고정하고 이송용 기체를 이산화탄소(CO₂)가스로 전환한 경우의 그래프가 Fig. 6에서 MILD로 표기한 부분이다. 그림에서와 같이 잔류 산소농도의 변화는 거의 없는 상태에서 NOx이 농도는 80 ppm에서 90 ppm사이로 약 30%가 감소함을 알 수 있다. 이 감소량은 비록 가스연소에서 70% 감소에 비하면 작은 양이지만 고체연료의 연소에서 질소산화물의 배출이 매우 높은 기존의 연소방식을 감안할 때 크게 주목할 만한 수치이다.

지금까지 폐기물의 소각이나 석탄연소 및 바이오매스의 연소에서 다량 발생하는 NOx는 연소과정에서 저감할 수 있는 적당한 방안이 없었기 때문에 NOx의 저감은 오로지

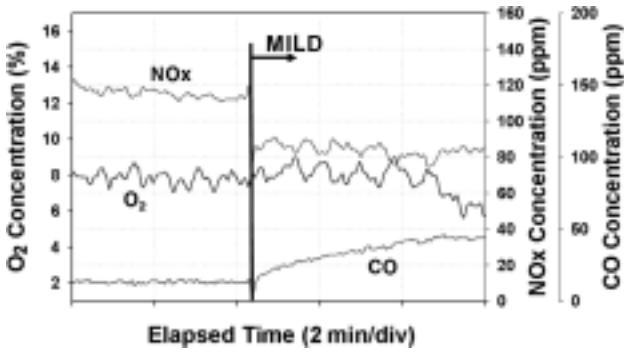


Fig. 6. O₂, CO and NO_x emission in each combustion mode of solid fuel(air and CO₂ gas carrying).

SNCR 및 SCR과 같이 고가의 설비비와 운영비가 소요되는 후처리설비에 의해 저감할 수밖에 없었음을 고려하면 30%의 저감은 이와 같은 후처리설비의 부하를 30% 줄일 수 있다는 것이므로 연소방식의 조정으로 큰 경제적 효과를 얻을 수 있는 것이다. 여기서 특이한 것은 이산화탄소를 이송기체로 한 경우에도 오히려 CO의 발생농도는 전체적으로 매우 낮아 이산화탄소로 인해 연소상태가 악화되는 경우는 나타나지 않으며 오히려 연소반응이 개선되는 것으로 보인다.

여기서 이송용 기체를 이산화탄소로 하였으나 실제 산업적 적용에서 이산화탄소를 사용하기는 어려우므로 이송용 기체로 이용할 수 있는 것은 바로 연소에 의해 발생하는 배기가스이다. 그러나 배기가스 중에는 질소(N₂)성분이 대부분이므로 이 질소로 인해 연소반응 과정에서 NO_x의 농도가 증가하지 않는지를 검증하여야 한다. 본 연구에서는 이에 대비하여 질소가스를 이송기체로 사용할 경우에도 고려해 보았다.

다음의 Fig. 7은 이송용 기체를 질소로 한 경우의 배기가스 측정결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 MILD연소 모드에서 질소를 이송기체로 한 경우에도 NO_x의 배출농도는 90 ppm 내외로 이산화탄소의 경우와 크게 차이가 없다. 즉 배기가스 중에 함유된 질소성분으로 인하여 NO_x의 농도가 증가되지 않는다는 매우 고무적인 결과인 것이다. 그림에서 초기에 당량비 $\phi=0.75$ 이었으나 NO_x의 농도를 보다 저감시키기 위하여 일산화탄소의 농도가 크게 증가하지 않는 범위에서 공기량을 줄여 후반부에는 당량비 $\phi=0.80$ 으로 운전하였다. 공기량이 감소함에 따라 CO의 농도가 280까지 다소 상승하였지만 NO_x의 농도는 80 ppm으로 감소하였다. CO의 배출농도는 일반적으로 연료와 공기의 혼합성에 크게 좌우되므로 혼합효율을 상승시키는 방안을 적용하면 높은 당량비에서도 CO가 많이 발생하지 않으면서 NO_x의 발생농도를 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

이 결과에서 확인한 바와 같이 배기가스 중의 질소성분이 NO_x의 발생농도를 증가시키지 않으므로 배기가스를 고체연료의 이송용 기체로 사용하여도 NO_x의 배출농도를 저감할 수 있는 MILD연소가 가능한 것으로 사료된다.

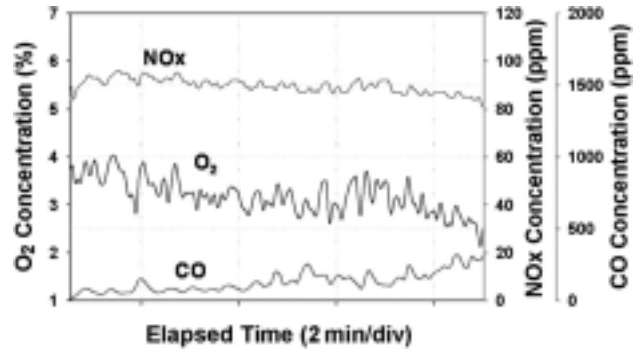
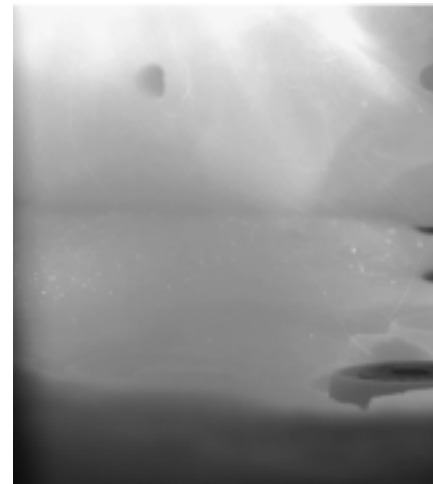
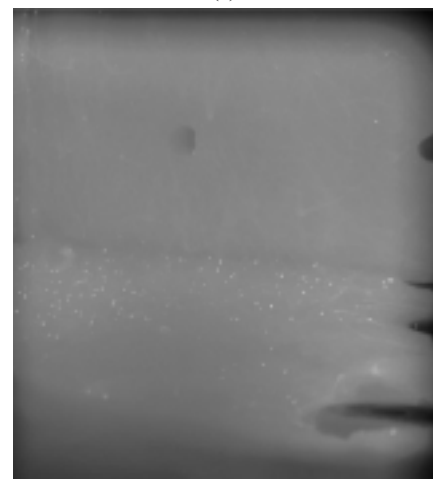


Fig. 7. O₂, CO and NO_x emission in each combustion mode of solid fuel(N₂ gas carrying).

다음의 그림 Fig. 8은 톱밥연료에 대하여 공기를 이송한 경우의 화염과 이산화탄소로 이송한 경우에 연소로의 내부를 촬영한 사진이다. Fig. 8(a)는 공기를 이송기체로 이용한 경우이며 노즐 부분에서는 화염이 보이지 않으나 연소로 외곽에서 가시화염이 나타남을 알 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 8. Flame of each combustion mode, (a)air-carrying sawdust, (b)CO₂-carrying sawdust.

노즐부에서 화염이 나타나지 않는 이유는 고체연료인 상온상태의 톱밥이 가열되는 시간이 필요하므로 연소로에 유입되는 속도에 비해 휘발분의 이탈이나 가스화되는 시간이 느리기 때문으로 판단된다. 이 고체연료들은 상부로 유동하는 과정에서 가열되어 휘발분이 이탈하면서 가스상으로 되고 다시 공기류와 혼합되어 연소되면서 가시화염이 나타나는 것이다. 이 가시화염은 이송기체인 상온의 공기와 가스화된 고체연료의 가연성분이 혼합되면서 확산연소함으로써 나타나는 것으로 MILD연소로 전환되지 못하는 원인이 된다.

반면 이산화탄소를 이송기체로 사용한 경우에는 연소로 내에 유입된 고체연료는 상부로 유동하면서 로 내부의 고온에 의해 가스화되고 이는 다시 고온으로 가열된 주변 노즐에 의해 분사된 공기와 혼합되면서 연소되므로 MILD연소가 이루어질 수 있는 것이다. Fig. 8(b)에서 보는 바와 같이 이산화탄소를 이송기체로 사용한 경우에는 가시화염이 나타나지 않는다. 다만, 가스상으로 전환되지 못한 고체연료의 고형성분이 고온으로 가열되어 숯불입자의 형태로 날리는 것이 관찰된다. 이 고형성분의 표면온도를 측정하지는 못하였으나 상당히 높을 것이므로 이에 의한 NOx의 증가로 인해 기체연료에서와 같은 높은 NOx저감효과를 고체연료에서 기대하기에는 어려울 것으로 사료된다.

다만, 고체연료의 경우에는 연소로에 유입된 후에 보다 많은 성분이 조기에 가스화되어 잔류고형성분의 양을 최소화할 수 있도록 한 다음 고온의 공기에 의해 산화될 수 있도록 하는 구조설계가 필요할 것이다.

다음의 Fig. 9는 예열공기의 온도 및 연소로 내부의 온도변화를 측정된 결과를 도시한 것으로 그림에서 1 구역은 연소로의 예열을 위하여 천연가스를 이용하여 종래의 확산연소방식으로 연소한 경우이며, 구역 2는 천연가스의 MILD연소모드, 3은 고체연료인 톱밥에 대하여 공기를 이송기체로 이용한 경우의 온도분포이다. MILD연소가 시작되면서 공기는 더 이상 예열되지 않는다. 그림에서 보는

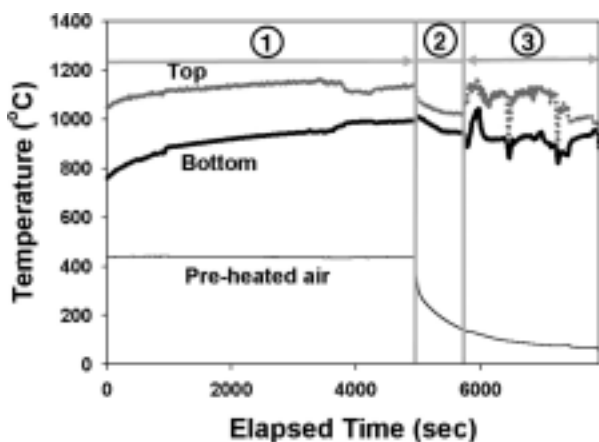


Fig. 9. Temperature profiles of top and bottom of furnace and pre-heated air. (1)conventional NG, (2)MILD NG, (3) air-carrying sawdust.

바와 같이 연소로의 상부와 하부의 온도를 비교해 보면 천연가스의 확산연소인 구역 1과 공기를 이송기체로 하는 톱밥의 연소인 구역 3에서보다 MILD연소영역인 구역 2에서의 온도 편차가 거의 1/2 이상 낮음을 알 수 있다. 즉, MILD연소모드에서는 고온의 가시화염대가 축소되거나 없어지는 이유로 연소로 내부의 전체온도가 균일해지게 되는 것이다. 물론 부력의 효과로 인해 고온이 상부에 형성되지만 하부와 온도편차가 감소하게 되는 특징을 가진다.

4. 결론

기체연료인 천연가스와 고체연료인 평균입경 355 μm 이하의 톱밥에 대하여 기존의 연소방식과 MILD연소방식을 적용하여 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 천연가스의 확산연소에서의 NOx생성농도에 비하여 MILD연소모드에서 NOx의 생성농도가 약 70% 감소하였으며 MILD연소모드에서는 가시화염이 전혀 관찰되지 않았다.
- 2) 톱밥연료의 연소에서 공기를 이송기체로 하여 노즐에서 분사 연소한 경우에는 기존의 확산연소와 거의 유사한 화염형태를 나타내었으며 NOx의 생성도 감소하지 않았으나 이산화탄소와 질소를 이송기체로 하였을 경우에는 가시화염이 나타나지 않는 MILD연소모드의 구현이 가능하였으며 NOx의 생성농도는 공기이송 연소에 비하여 약 30% 감소하였다. 이로써 이송기체를 연소배기가스로 대체함으로써 산업적으로 적용할 수 있는 가능성을 확인하였다. 고체연료의 경우 가스화 되지 않은 잔류고형물이 고온으로 가열된 숯불입자의 형태로 비산하였으며 이로 인해 NOx의 감소효과가 작은 것으로 판단된다.
- 3) MILD연소의 구현이 산화제인 공기를 별도의 예열장치 없이 가능함을 확인하였다. 기존 연소방식에 비하여 MILD연소모드에서 연소로 내부의 상하부 온도편차가 감소하며 이는 고온의 화염대가 나타나지 않음으로 인해 전반적인 연소영역의 온도가 균일해지는 것으로 MILD연소의 NOx저감효과를 설명할 수 있는 특징적인 현상이다.

참고문헌

1. Hiroshi Tsuji et al., "High Temperature Air Combustion," CRC Press(2003).
2. Flamme, M., "Low NOx combustion technologies for high temperature applications," *Energy Conversion and Management*, **42**, 1919~1935(2001).
3. Cavaliere A., de Joannon, M., "MILD Combustion," *Prog. Energy Combust. Sci.*, **30**, 329~366 (2004).
4. Dally, B. B., Riesmeier, E., and Peters, N., "Effect of Fuel Mixture on MILD Combustion," *Combust. Flame*, **137**, 418~431(2004).
5. Szegő, G., Dally B. B., Nathan, G. J., "Scaling of NOx

- Emission from a laboratory Scale MILD Combustion Furnace Operating at Moderate temperatures,” CNF, under review(2007).
6. Szegő, G., Dally B. B., Nathan, G. J., and Christo, F. C., “Performance Characteristics of a MILD Combustion Furnace,” 6th Asia-Pacific Conference on Combustion, pp. 20~23(2007).
 7. Weber, R., Smart, J. P., and Kamp, W., “On the (MILD) combustion of gaseous, liquid, and solid fuels in high temperature preheated air,” *Proceedings of Combustion Institute*, **30**, 2623~2629(2005).
 8. Orsino, S., Tamura, M., Stabat, P., Constantini, S., Prado, O., Weber, R., “Excess Enthalpy Combustion of Coal,” IFRF Doc, NO. F46/y/3(2000).
 9. 양제복, 김원배, 노동순, “축열버너의 연소특성에 대한 실험적 연구”, 한국연소학회지, **5**(1), 99~108(2000).
 10. 박민철, 김동일, 오상현, “고온의 예열공기를 이용한 액체연료의 분무연소특성에 관한 실험적연구”, 한국연소학회지, **7**(3), 1~8(2002).
 11. 조은성, 小林秀昭, 정석호, “대향류 확산화염의 고온공기 연소특성에 관한 수치해석”, 한국연소학회지, **8**(4), 9~14(2003).
 12. 강민욱, 김종규, 윤영빈, 동상근, “자기축열식 저NO_x 연소기에서 배가스 재순환이 연소특성에 미치는 영향”, 한국연소학회지, **8**(1), 17~24(2003).