

맥동연소기술을 적용한 산업용 복사관 버너시스템의 특성 평가[§] - NO_x 저감 및 성능 향상 -

오혁진^{*†} · 조한창^{*} · 조길원^{*}

* 에너지자원연구본부, 포항산업과학연구원(RIST)

Characteristic Evaluation of Industrial Radiant Tube Burner System with Oscillating Combustion Technology - NO_x Reduction and Performance Improvement -

Hyuk Jin Oh^{*†}, Han Chang Cho^{*} and Kil Won Cho^{*}

* Energy Resources Research Department, Research Institute of Industrial Science & Technology (RIST)

(Received December 16, 2010 ; Revised February 7, 2011 ; Accepted February 14, 2011)

Key Words: Oscillating or Pulsating Combustion(맥동연소), Radiant Tube Burner(복사관 버너), NO_x Reduction(질소화합물 저감)

초록: 맥동연소기술을 적용한 산업용 복사관버너의 연소특성을 살펴보기 위해 실규모 (120,000 kcal/h) 산업용 복사관버너 설비를 사용하여 실험실 및 현장 테스트를 수행하였다. 제철부생가스를 사용하는 산업용 복사관버너의 3 가지 종류를 하나의 W 형 복사관이 장착된 실험설비에서 실험하였다. W 형 복사관이 다수 사용되는 대형 설비를 이용하여 장기운영 실험을 실시하였다. 맥동연소기술을 적용한 기 실험설비들을 대상으로 성능향상 및 배가스조절 측면에서 다양한 실험조건으로 테스트를 진행 하였다. 맥동연소기술의 적용가능성 평가를 위해 NO_x 저감 및 효율향상을 분석하였다. 맥동연소기술의 적용결과 에너지 절감, 복사관 수명 향상 및 생산성 향상 등이 얻어짐을 확인할 수 있었다. 최고의 성능 및 배가스 조절을 얻기 위한 최적의 운전조건이 각 버너별로 결정되었다.

Abstract: Combustion characteristics of industrial radiant tube (RT) burners with forced oscillating combustion technology are investigated using a real-scale (125,000 kcal/h) industrial RT burner facility in both laboratory and field tests. Three different types of industrial RT burners using a by-product gas from the iron-and-steelmaking process are examined in a laboratory facility equipped with a W-type RT. During the field tests, an industrial RT burner is characterized in a large facility equipped with multiple RTs. Their performance and emission controls are investigated under diverse operating conditions. The feasibility of the forced oscillating combustion technology is evaluated by the extent of NO_x reduction and the efficiency improvement. These improvements are able to save energy, extend the RT lifetime, and enhance productivity. The operating conditions that achieve the best performance and emission control for each RT burner are determined.

1. 서 론

맥동연소기술(Oscillating or Pulsating Combustion Technology)은 산화제 또는 연료에 자율적 또는 타율적으로 주기적인 압력변동이 가해지면서 유량

변동이 일어나고, 그 결과로 공기과잉과 공기희박 조건에서 연소가 반복적으로 발생하는 연소기술이다. 맥동 발생 초기에는 공기희박과 공기과잉이 뚜렷이 나타나며, 하류로 진행되면서 그 정도가 점차 감소하여 목표로 하는 공기비를 얻는다. 맥동연소기술의 실질적인 구현을 위해서 압력으로 공급유량을 변화시키는 방법과 공급라인에서 유량 자체를 직접 제어하는 방법이 주로 사용된다. 맥동연소로 발생하는 강한 유동교란으로 대류 열전달률 상승, 열효율 향상 및 복사관 온도 균일

§ 이 논문은 대한기계학회 2010년도 추계학술대회(2010. 11. 3.-5., ICC 제주) 발표논문임

† Corresponding Author, hyukjinoh@rist.re.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

화로 인한 수명 증대효과를 얻을 수 있다.⁽¹⁾ 또한 맥동연소기술은 점차 강화되고 있는 NO_x 배출규제를 통과하기 위한 기술 중 비교적 저렴한 비용으로 운영이 가능한 기술로 이해된다. 따라서 설치비용 및 운용비용이 높은 기존의 연소후처리 설비보다 중소형 열처리로 업체에 적용이 적합한 기술로 사료된다. 또한 대형 열처리로 업체나 철강업체에서도 에너지절감 및 열효율상승을 기대할 수 있어 맥동연소기술의 다양한 적용이 기대된다. 그러나 맥동연소기술은 아직 실 적용 되지 못한 기술로 최근 연구결과⁽¹⁻⁶⁾를 바탕으로 그 적용을 점차 확대해 나가야 할 기술로 평가된다.

인위적으로 맥동주기(cycle or frequency), 맥동진폭(amplitude) 및 듀티 비(duty ratio)를 조절하는 타율적 맥동연소는 자율적 맥동연소에서 발생하는 고소음 및 고농도 CO 등의 문제점을 극복할 수 있다. 타율적 또는 강제적 맥동연소의 경우 연료나 산화제를 공급라인에서 각각 제어하는 방법이 주로 사용된다. 산화제를 제어하는 경우 연료배관보다 직경이 큰 산화제배관에 맥동제어밸브가 장착되므로 밸브제어속도가 감소하거나 예열되는 산화제의 온도에 의해 제어밸브의 손상이 발생하는 문제점이 있어, 본 연구에서는 연료를 제어하는 방법을 채택하였다. 맥동주기(Hz)는 단위 시간당 맥동이 발생하는 수이며, 맥동진폭(Nm³/h)은 맥동으로 발생하는 연료량의 변화를 나타내며, 듀티 비(%)는 한 주기내 맥동제어밸브의 개방시간으로 정의된다.

맥동연소기술에서 NO_x 저감원리는 Fig. 1에서와 같이 평균운전조건이 NO_x를 가장 많이 발생하는 조건인 공기비 = 1.1 부근을 벗어나는 조건으로 버너가 운전되고, 그 결과 화염온도가 급격히 감소하여 thermal NO_x의 발생량이 저감된다. 맥동연소에서 NO_x 저감율은 맥동주기, 맥동진폭 및 듀티 비 등에 의존되며, 이 변수들의 적절한 조합으로 NO_x 저감 증대, 완전연소성 증대(CO 배출량 감소), 화염안정성 증대, 열효율 향상, 연소소음 감소 등 최적운전조건 도출이 가능하므로 맥동연소기술의 실 적용시에 이들을 중요한 평가인자로 고려하는 것이 바람직하다.

복사관 버너시스템(radiant tube burner system)은 복사관내에서 연료를 연소시켜 복사관을 적열시키고 관 외벽에서 방사되는 복사열로 피가열물을 가열하는 간접가열방식을 사용하는 시스템이다. 복사관 버너는 분위기제어가 필요한 열처리로(소둔로, 침탄로 등)에 장착되어 사용되고 국내 약

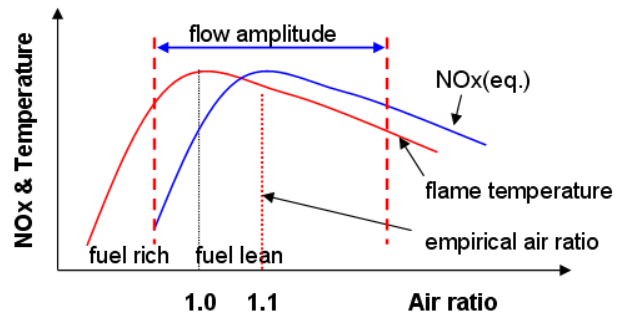


Fig. 1 Principle of NO_x reductions in the oscillating combustion

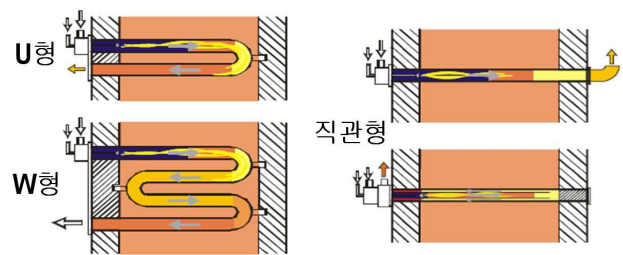


Fig. 2 Prevalent radiant tube burner systems

7000 여기가 운영 중에 있어 국내 연소로 에너지 소비량의 약 20%를 점유하고 있다. 열처리로는 통상적으로 I.D. ≤ 20cm의 다수개의 복사관이 부착되고, 각각이 7 ~ 20만 kcal/h의 연소용량을 갖는 버너가 설치된다. 다양한 종류의 복사관 중 Fig. 2와 같이 U형, W형 및 직관형의 복사관이 국내에 주로 사용된다. 산화제로 공기 또는 고농도 산소를 포함한 공기를 사용한다. 재생기(recuperator)를 사용하거나 축열방식으로 배가스 현열을 회수하여 산화제를 250 ~ 450℃로 예열된 상태로 버너에 공급하는데, 가열로 등의 직접가열 방식 연소로에 비해 NO_x 배출량이 높다.

상용버너를 대상으로 현장시험을 수행한 결과⁽¹⁾에 따르면 단조로, 소둔로, 용해로, 가열로 등 실규모 설비에서 28 ~ 55%의 NO_x 저감과 3 ~ 5%의 에너지절감이 가능하였고, 낮은 맥동주기 및 높은 맥동진폭에서 최대효과를 얻었다. 실규모 열처리용 복사관 버너시스템에 맥동연소 기술을 적용한 경우⁽⁶⁾ 맥동주기 = 2.5Hz, 듀티 비 = 20 ~ 30%의 조건에서 가장 안정적인 운용이 가능할 것으로 판단되었고, 이때 8 ~ 30%의 NO_x 저감과 4%의 열전달률 향상을 보였다. 반면 맥동주기 > 3.0Hz, 듀티 비 > 50%의 조건에서는 맥동효과가 크지 않은 것으로 판단되었다. 또한 버너구조에 따라 CO 배출농도가 크게 변화함을 알 수 있었다.

본 연구는 제철 부생가스를 이용하는 실규모 복사관 버너시스템에 맥동연소기술을 적용하여 시스템의 성능향상 정도를 평가하기 위하여 시도되었다. 이를 위해 NO_x 저감, 열효율 향상, 완전연소성 향상 (또는 CO 배출량 감소)에 대한 분석이 이루어졌다. 성능평가를 위해 12.5 만 kcal/h 급 연소용량의 복사관 버너 시험설비를 구축하고, 3 가지 상용버너에 대하여 시험을 진행하였다. 맥동제어를 위해 솔레노이드형 밸브와 제어기를 사용하여 맥동제어밸브시스템을 구축하였고, 연료로 제철 부생가스 (Coke Oven Gas, COG), 산화제로 공기를 사용하였다. 하나의 W 형 복사관을 구비한 12.5 만 kcal/h 급 시험설비와, 다수개의 복사관으로 구성된 대형 산업용설비에서 맥동연소기술의 성능평가가 시도되었다.

2. 연구 내용

2.1 시험설비

맥동제어를 위해 솔레노이드형 밸브, 제어장치, 함수발생기를 사용하여 제어밸브시스템을 Fig. 3 과 같이 구현하였다.⁽³⁾ 이는 응답성이 빠르고 오차가 비교적 적은 소형 밸브시스템에 적합하며, 다수의 맥동밸브 제어 및 맥동주기와 듀티 비의 제어가 가능하였다. 또 가스누출 방지 및 장치운용 측면 에서 신뢰성이 좋은 것으로 판단되었다.

맥동연소의 성능평가를 위해 열처리 시험로를 Fig.4 와 같이 구성하였다. 하나의 W 형 복사관을 내장한 시험로, 제어패널, 유로계, 버너, 재생기 (recuperator), 그리고 배가스 냉각장치로 구성되어 있는데, 가스의 흐름은 시스템 후단에 유인송풍기 (induced draft fan, IDF)로 제어하였다. 버너는 탈부착이 용이하게 설치하였고, 솔레노이드형 맥동 제어밸브는 버너 전단의 연료배관에 부착하였으며, bypass 로 일정량의 연료를 공급하여 맥동연소시 화염의 소화를 방지하였다. 연료로 제철 부생가스 (Coke Oven Gas, COG)와 산화제로 공기를 사용하였다. 부생가스 (COG)의 조성과 평균 발열량은 Table 1 에 제시하였다.

W 형 복사관은 I.D. = 180mm 의 인코넬 소재로 제작되었고, 복사관 한쪽은 버너가 부착되고 다른 한쪽은 연소가스가 배출되는데, 이곳에는 공기를 250 ~ 350℃로 예열할 수 있는 재생기(recuperator) 를 설치하였다. 시험로는 향후 실규모 복사관 버너시스템에 대한 실증을 위해 크게 제작하였는

Table 1 Properties of gas used

Gas	Unit [%]						
	H ₂	CO	N ₂	CO ₂	CH ₄	O ₂	LHV [kcal/Nm ³]
COG	56.4	8.4	2.3	3.1	29.5	0.3	4400



Fig. 3 A solenoid valve and a control device

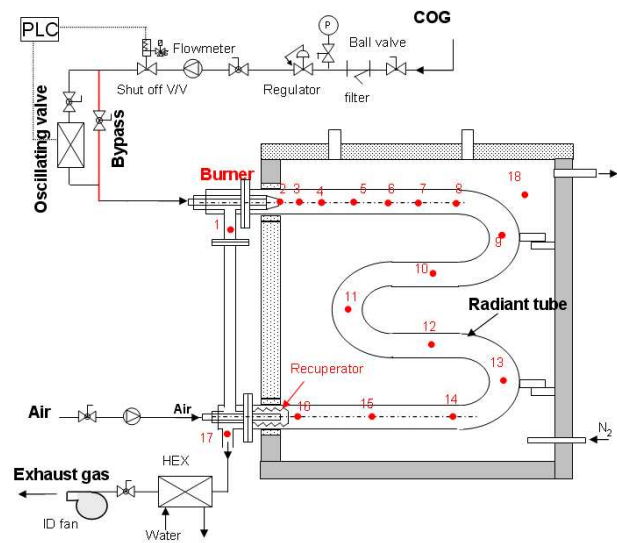


Fig. 4 Schematic diagram of laboratory testing facilities

데, 본 연구에서는 복사관에서 양쪽으로 25cm 의 여유공간을 주고 나머지는 막고 세라믹 울(wool) 로 단열처리 하였다. 맥동연소기술을 적용한 복사관 버너시스템의 전열성능을 평가하기 위하여 Fig. 4 와 같이 복사관 표면과 시험로에 총 18 개의 K 형 열전대를 부착하여 비맥동 및 맥동연소조건 에서 복사관의 온도를 측정하였다. 복사관의 표면 온도는 동축상에 위치한 15 개(#2 ~ #16)의 열전대를 이용하여 측정하였고, 공기온도(#1), 배가스 온도(#17), 그리고 로내에 삽입된 #18 번 열전대를 통해 시험로의 승온율을 측정하였다.

다수개의 복사관으로 구성된 대형 산업용설비에서는 복사관 버너 전단의 기존 연료라인에 맥동 제어밸브를 포함하는 연료라인을 설치하여 맥동 연소기술을 실증하였다.

2.2 복사관 버너

시험설비용 복사관 버너들은 다양한 실적용 설비를 고려하여 총 연소용량을 복사관의 보편 적인 용량인 12.5 만 kcal/h 급이다. Fig. 5 은 복사관 에 삽입되는 버너의 외관을 나타내었다. 복사관과 연결되는 버너 플랜지부위에서 끝단까지 연료배관이 동일하게 연결된다. 연료배관의 측면에 돌출된 공기분배구가 부착되고, 연료배관의 전단면에 연료-공기노즐이 달린 노즐 어셈블리(assembly)가 장착된다. 초기에 버너의 점화를 위해 점화기가 노즐 어셈블리 주위에 설치된다. Fig. 6 은 버너 끝단에 장착되는 연료-공기노즐 어셈블리를 버너 별로 도시하였다. 노즐 어셈블리는 공기를 균일 하게 분배해주는 다공판과 연료를 분사해주는 연료노즐로 구성된다. 연료노즐은 전면과 측면에 하나 이상의 연료 분사구를 가지며, 그 수를 조절 하여 예혼합화염형 버너 또는 확산화염형 버너의 특성을 갖도록 설계할 수 있다. 즉, 전면에 비해 측면의 분사구 수가 많으면 공기와의 선혼합이 증가되어 예혼합화염형 화염이 연어질 것이며, 전면 분사구 수가 많으면 혼합지연을 통한 확산 화염형 버너구조를 갖도록 할 수 있다. 버너 1 은 하나의 연료분사구(또는 단공형 파이프)가 전면에 존재하고 그 외곽으로 공기가 다공판을 통해 분사 되어 확산화염형 버너의 특성을 가진다. 확산화염 형 버너는 상대적으로 화염이 길어지는 특징을 가진다. 버너 2 는 전면 5 개, 측면 4 개의 연료분사 구를 가지며 노즐 외곽으로 다공판을 통해 공기가 분사되어 연료와의 선혼합이 발생하여 예혼합화염 이 형성된다. 또한 연료노즐 측면에 다수의 분사 구가 있어 화염유지에 다소 유리할 것이다. 버너 3 은 상대적으로 다공판의 다공수가 적고, 다공 크기가 커서 공기의 흐름이 부분적으로 집중되는 현상이 나타난다. 연료노즐은 원뿔모양으로 전면 에 1 개의 분사구와 일정 각도를 가진 8 개의 측면 분사구를 가져 예혼합화염형 버너의 특징을 보인다. 각 복사관 버너의 운전조건은 Table 2 와 같으며 맥동진폭 및 맥동주기를 변화시키면서 배가스와 온도를 측정하였다.

2.3 시험방법 및 조건

맥동연소에서 이상적인 유동패턴은 Fig. 7 과 같 이 기본 연료유량(A_0)이 있고 맥동밸브가 개방



Fig. 5 125,000 kcal/h industrial RT burner equipped in the laboratory testing facility

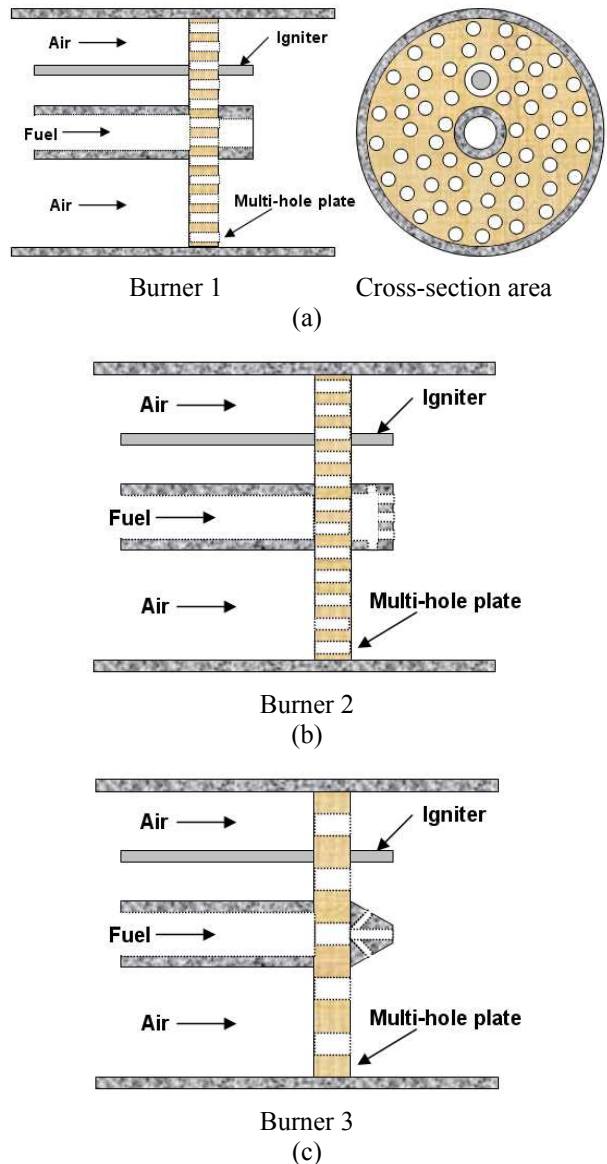


Fig. 6 Fuel-air nozzle assemblies equipped in the RT burner for the laboratory tests

되면 맥동진폭($A-A_0$)만큼 유량이 증가되어 총유량 (A)이 공급되고, 밸브가 차단되면 bypass 를 통하여 A_0 만 공급된다. 이때 평균유량(S)은 일정하게 유지된다. $A_0 = 0$ 인 경우 (전체 연료유량에 맥동을

적용할 경우) 실제 운용상에서 화염이 소화될 가능성이 있으므로 pilot burner 를 사용하는 것이 좋다. 맥동류로 공급되는 연료는 압축성 유체이기 때문에 무한대의 응답속도를 갖는 램프 파로 나타내기는 어렵다. 또한 제어밸브에서 연료 유량의 변동이 이상적인 유량사이클을 보여도 버너노즐까지 가면 그 변동성의 선명성이 저하 되면서 사인파의 형태를 갖는다. 맥동주기(T_w), 한 주기내 닫힘시간(T_c), 밸브개방시간 ($T_w - T_c$)을 이용 하여 듀티 비 ($(T_w - T_c)/T_w$)를 결정한다. 듀티 비가 증가하면 주기당 밸브개방시간이 증가한다. 맥동 연소에서는 주기적으로 변하는 맥동유량을 정확히 측정하기 어려운데, 본 연구에서는 배가스내 산소 농도를 측정하여 비맥동의 경우와 0.1% 이내의 오차가 되도록 조절한 후 분석을 수행하였다. 배가스내 NO_x 와 CO 농도는 다음과 같은 방법으로 측정하였다. 각각의 버너는 공기비 = 1.1 의 조건에서 비맥동상태로 로내 온도를 950℃까지 승온시킨다. 배가스내 NO_x 와 CO 농도를 5 분 동안 10 초 간격으로 측정하여 데이터를 저장한 후 맥동연소시험을 수행하였다. 맥동주기에 따라 변동되는 연료유량에 의해 배가스내 산소농도가 변화되는데, 시험조건의 일치를 위하여 배가스내 산소농도를 비맥동시 산소농도(O₂ = 4.5%)와 동일하게 조절하고 10 초 간격으로 10 분 이상 배가스 농도가 안정될 때까지 측정하였다. 안정화된 측정 결과를 유효한 시험 데이터로 활용하였다. 이전

Table 2 Operating conditions for laboratory tests

버너	버너1, 2, 3
총 연소용량	12만kcal/h
총 연료유량	28.4Nm ³ /h
맥동진폭	8.4 ~ 10.4Nm ³ /h
공기유량 (공기비=1.1)	140Nm ³ /h
듀티 비	30%
맥동주기	2.2 ~ 2.8Hz

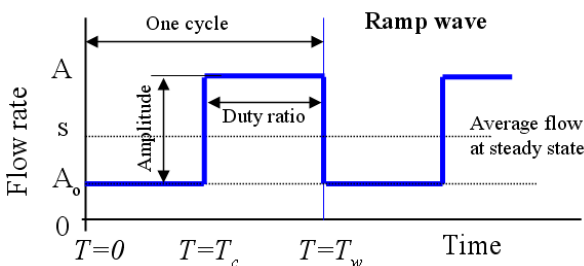


Fig. 7 Ideal flow rate cycle of the oscillating combustion

연구결과⁽⁶⁾에서 맥동주기와 관계없이 듀티 비가 증가할수록 NO_x 가 증가하였고 듀티 비 > 40% 에서는 NO_x 저감효과가 없었기 때문에 듀티 비 = 30%로 정하여 맥동시험을 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 NO_x 저감 효과

NO_x 저감성능을 평가하기 위하여 비맥동조건에서 온도에 따른 NO_x 배출량을 먼저 측정하고 맥동조건에서 NO_x 배출량과 비교하였다. 또한 완전연소성을 평가하기 위해 CO 배출량을 측정하였다. 맥동진폭이 증가할수록 NO_x 저감성능은 증가하였고, 맥동진폭 = 10.4Nm³/h 에서 가장 우수한 성능을 보였다. 그 결과는 Table 3 과 Fig. 8 에 도시하였다. 모든 버너에서 NO_x 저감율을 최대 40%까지 얻을 수 있었으나 완전연소성이 낮아 CO 배출량이 매우 높음을 보였다. 장기운용을 위한 버너별 최적 운전조건은 완전연소성이 좋고 NO_x 저감율이 높은 조건으로 선정하였고, 버너 2 의 경우 맥동 주기 2.6 ~ 2.8 Hz, 버너 3 은

Table 3 NO_x reductions (%) and CO emissions (ppm) in optimum operating conditions (oscillating amplitude = 10.4Nm³/h)

맥동 주기 (Hz)	버너1		버너2		버너3	
	NO _x 저감	CO 배출량	NO _x 저감	CO 배출량	NO _x 저감	CO 배출량
2.2	-	-	40	3480	37	4426
2.4	-	-	34	420	24	2400
2.6	-	-	28	169	24	1550
2.8	38	7315	25	183	25	1110
3.0	-11	61	-	-	-	-

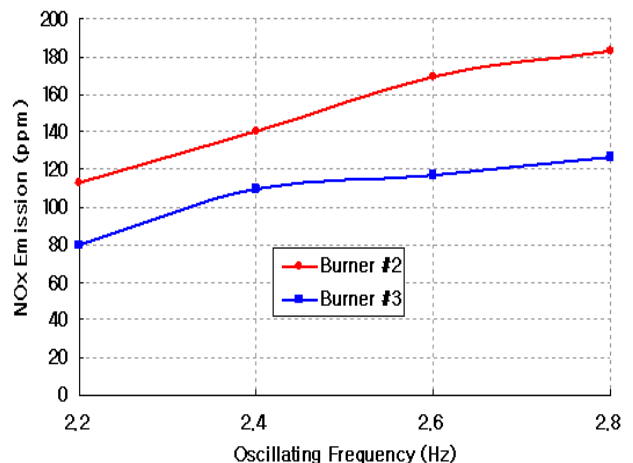


Fig. 8 NO_x emissions for burner #2 and #3 in optimum operating conditions (oscillating amplitude= 10.4Nm³/h)

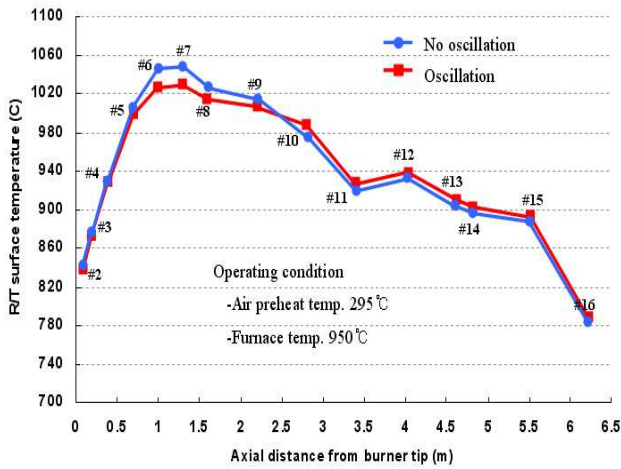


Fig. 9 Surface temperature distribution of the RT in the conditions with and without the oscillation

맥동주기 2.8Hz 에서 최적 운전조건을 가지는 것으로 나타났다. 그러나 버너 1 의 경우 테스트된 운전조건에서는 맥동효과가 크지 않은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 버너의 특성에 기인한 것으로, 버너 2 & 3 은 예혼합화염형 버너로 NO_x 저감효율이 좋은 반면 버너 1 은 확산화염형 버너로 연료와 공기의 혼합이 지연되면서 완전연소성이 감소함을 보였다. 버너 3 은 다공의 수가 상대적으로 적어 공기가 집중되는 다공판의 구조에 의해 연소시 상대적으로 CO 배출량이 높아짐을 알 수 있었다. 따라서 각 인자들을 최적화 할 수 있는 조건이 버너별로 차이가 있음을 알 수 있었다.

3.2 성능 향상 효과

맥동조건 유무에 따른 복사관 표면온도분포를 Fig. 9 에 도시하였다. 버너로부터 1.0 ~ 1.3m 에서 1000°C이상의 최고온도 부분이 관찰되었으며, W 모양으로 꺾이는 부분에서 상대적으로 낮아지는 경향을 나타내었다. 맥동연소에 의해 복사관 최고온도가 20 ~ 30°C 감소하고 후단에서 온도가 전체적으로 증가하는 분포를 나타내어 복사관 온도의 균일성이 증가하였다. 따라서 최고온도의 감소로 인한 복사관의 열적파손이 감소할 것으로 예상되어 복사관 수명증대에도 효과가 있을 것으로 사료된다.

균일유속으로 연료가 공급되는 비맥동연소조건에서 버너 1, 2, 3 의 승온패턴은 유사하며, Fig. 10 은 버너 3 의 비맥동조건에서 로운의 승온패턴을 도시한 것이다. 상온에서 950°C까지 승온하는데 61 분 소요되었다. 연속운전을 하는 실설비에서 통상적

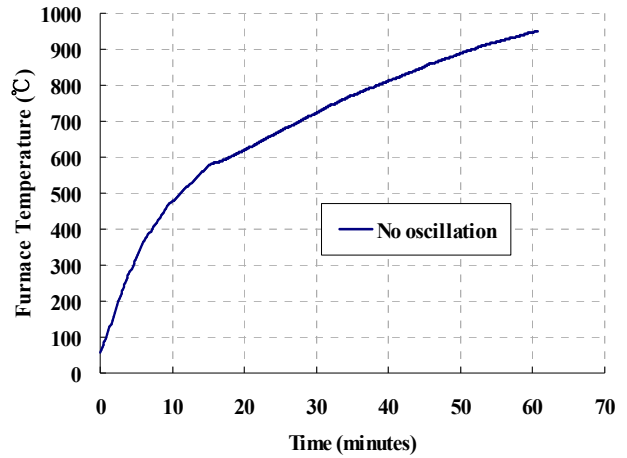


Fig. 10 Furnace heating pattern without oscillating using the conventional burner 3

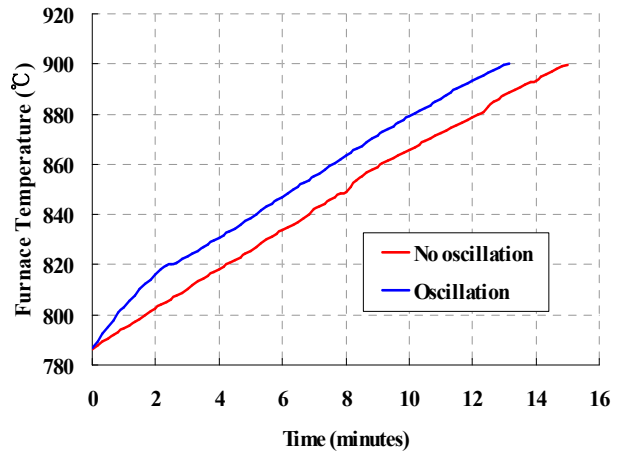


Fig. 11 Furnace heating patterns with/without oscillating using the conventional burner 3

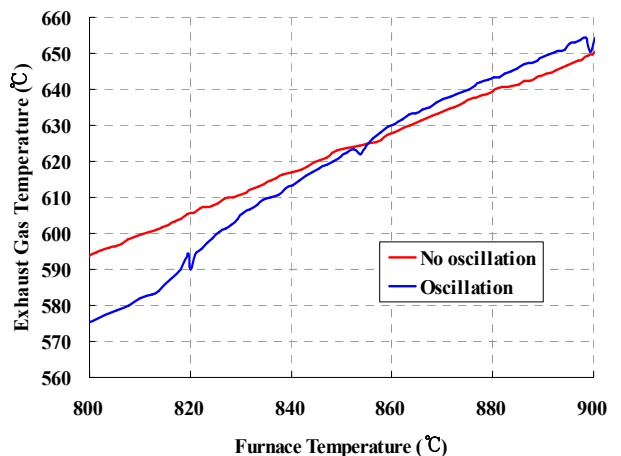


Fig. 12 Exhaust gas temperatures with/without oscillating using the conventional burner 3

으로 800 ~ 900°C로 복사관이 운전되므로 이 온도 영역에서 비맥동과 맥동조건에서의 전열성능을 Fig. 11 과 같이 비교하였다. 비교영역내 승온율은 맥동

조건에서 12% 증가함을 보였으며, 이는 12%의 열전달률 향상을 의미한다. 비맥동조건에서 맥동조건으로 전환된 후 맥동연소 초기에 두드러지게 나타났으며, 맥동연소가 진행되고 있는 상황에서 약 2%의 승온율 상승을 보였다.

Fig. 12는 로온에 따른 배가스온도분포를 도시한 결과이다. 로온 855°C 이하에서는 배가스온도가 낮아 배가스로 인한 에너지 손실이 맥동조건에서 크게 감소함을 보였고, 855°C 이상에서는 배가스 온도가 약간 증가하는 현상을 보였다. 따라서 800 ~ 900°C 영역에서 맥동효과에 의해 평균적인 에너지 손실 저감이 나타났으며, 약 3 ~ 4%의 에너지저감을 확인할 수 있었다. 설비의 운전조건에 따라 차이가 있으나 800 ~ 850°C로 운전되는 설비에서는 효과가 매우 좋을 것으로 예상된다.

3.3 대형 산업용설비의 맥동연소기술 적용 효과

다수개의 복사관으로 구성된 대형 산업용설비에서 맥동연소기술의 성능평가가 시도되었다. 유사한 비교조건에서 맥동연소에 의해 높은 완전연소성(CO < 15ppm) 및 낮은 NO_x 배출량(140ppm)을 얻었으며, 이는 20 ~ 27%의 NO_x 저감율을 나타낸다. 또한 맥동조건 유무에 따른 연료공급량을 모니터링하여 약 4%의 에너지절감을 확인하였다. 보다 상세한 분석 결과는 장기운전으로 인한 설비의 수명평가가 완료되는 시점에서 다시 기술할 예정이다. 맥동연소설비의 수명 분석 결과는 연료의 공급조건에 따라 크게 차이를 보일 수 있다. 연료의 이물질 포함 여부에 따라 맥동 제어밸브시스템의 운영기간이 단축되거나 유지/보수 주기가 짧아질 수 있다. 따라서 맥동연소설비의 수명분석은 수개월에 걸친 장기간의 운전기간을 필요로 하게 된다. 본 연구에서 보고된 대형 산업용설비의 성능평가 결과는 장기운전평가의 초기결과로써 운전조건을 정밀하게 조절하기 어려운 대형 산업용 복사관설비에서도 맥동연소기술의 효과적인 적용이 가능함을 예측할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구는 제철 부생가스를 이용하는 산업용 복사관 버너시스템에 맥동연소기술을 적용했을 경우 NO_x 저감 및 시스템 성능향상 정도를 평가하기 위해 시도되었다. 이를 위해 12.5 만 kcal/h 급 실규모 연소용량의 복사관 버너 시험설비를 구축

하였고, 다양한 상용버너를 대상으로 시험을 진행하였다. 또한 맥동연소기술을 대형 산업용설비에 실적용하여 기술의 검증을 시도하였다. 대형설비에 대한 상세결과는 장기 수명평가가 완료되는 시점에서 다시 기술하기로 하고, 본 연구에서는 장기운전의 초기결과를 보고하였다. 실험설비 및 대형설비의 연구결과는 유사하였다. 맥동연소조건에서 평균 20 ~ 30%의 NO_x 저감 및 3 ~ 4%의 에너지절감이 가능한 것으로 확인되었고, 복사관의 수명 증대에도 효과가 있을 것으로 판단되었다. 버너별, 설비별, 연소조건별로 장기운용이 가능한 최적운전조건 및 맥동효과는 차이를 보였으나 열처리용 복사관 버너시스템에 맥동연소기술의 적용이 충분히 가능함을 확인하였다. 향후 장기 수명평가 결과를 통해 맥동연소기술의 현장적용이 가능함을 확인할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 POSCO에서 수탁하여 진행된 것으로 수행과정에서 도움을 주신 많은 관계자 분들과 POSCO에 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

- (1) Wagner, J.C., 2004, "NO_x Emission Reduction by Oscillating Combustion," Final Report, GTI Project No. 61111.
- (2) Charon, O., Jouvaud, D. and Genies, B., 1993, "Pulsated O₂/Fuel Flame as a New Technique for Low NO_x Emission," *Combustion Science and Technology*, Vol. 90, pp. 1~12.
- (3) Cho, H.C. and Cho, K.W., 2007, "NO_x Reduction in Radiant Tube Burner using Low Frequency Oscillating Flows," *Proceeding of the 35th KOSCO Symposium*, pp. 149~154.
- (4) Cho, H.C., Cho, K.W. and Kim H.J., 2008, "NO_x Emission Characteristics in Radiant Tube Burner with Oscillating Combustion Technology," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 32, No. 2, pp. 100~106.
- (5) Cho, H.C., Hong, J.K. and Cho, K.W., 2009, "Evaluation of Feasibility of Oscillating Combustion Technology in Heat Treatment Furnace," *Proceeding of the 39th KOSCO Symposium*, pp. 73~78.
- (6) Oh, H.J., Cho, H.C. and Cho, K.W., 2010, "Analysis of Feasibility of Oscillating Combustion Technology in a Radiant Tube Burner System Using a By-product Gas in Iron-and-steelmaking Process," *Proceeding of the 40th KOSCO Symposium*, pp. 163~170.