

맥동연소기술이 접목된 복사관 버너에서의 NO_x 배출 특성

조한창[†] · 조길원* · 김후중**

(2007년 8월 16일 접수, 2007년 11월 30일 심사완료)

NO_x Emission Characteristics in Radiant Tube Burner with Oscillating Combustion Technology

Han Chang CHO, Kil Won CHO and Hoo Joong KIM

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

Abstract

An experimental study was carried out in a small-scale test furnace to investigate the performance, such as NO_x emission, enhancement of heat transfer, uniformity of temperature, and etc, of oscillating combustion applied in radiant tube burner system. A premixed type burner and a cyclic oscillating control valve were designed and used. The fuel, used commercial LPG in this study, was only oscillated using the cyclic oscillating control valve. As oscillating combustion was applied in radiant tube burner system, it is found that NO_x emission, compared to no oscillation, could be reduced by 38% at 90~120rpm (1.5~2.0Hz). However, as oscillating frequency was increased, effect of abatement of NO_x emission is gradually reduced. From the measurement of furnace heating time from 100°C to 720°C, heat transfer is increased by 11.5% at the oscillation of 120rpm. Temperature distribution of radiant tube surface is more uniform at oscillation of 120rpm with decrease of the peak temperature and increase of low temperature. From these results, it is confirmed that oscillating combustion is useful in radiant tube burner system.

기호설명

Tw : 맥동주기
Te : 한주기내 개방시간

1. 서론

연소과정중에 발생하는 NO_x 는 그 유해성이 인정되어 환경규제물질로 규제되고 있으며, 그 규제정도는 더욱 엄격해지리라 예상된다. 연소 후처리기술을 통한 NO_x 저감도 최근 도입되고

있으나 중소 열처리로업체에서는 후처리기술의 도입이 힘든 것이 현실이다. 다양한 저 NO_x 연소기술이 도입되어 실 적용되고 있으나 맥동연소 기술은 최근까지 실 적용되지 못한 연소기술이며, 외국의 연구결과를 바탕으로 그 적용이 점차 확대될 것이라 사료된다.

맥동연소(oscillating combustion)는 연료 또는 산화제에 자의적 또는 타의적으로 주기적인 압력변동이 가해지면서 유량변동과 함께 연소반응이 이루어지도록 하는 연소기술이다. 자의적으로 발생한 맥동을 이용한 연소기술은 고소음 발생, CO 다량 발생, 그리고 턴다운(turn-down) 비가 좁은 한계를 갖고 있다. 이에 반해 맥동 제어밸브를 통해 인위적인 맥동주기와 진폭 등을 주는 타의적 맥동은 고소음과 CO 다량 발생 등의 자의적 맥동연소의 문제점을 극복할 수 있다. 이에 본 연구에서는 밸브를 구동하여 연료에 타의적인 맥동을 주는 연소기술을 적용 기술로 채택하였다.

† 책임저자, 회원, (재)포항산업과학연구원
E-mail : hccho@rist.re.kr
TEL : (054)279-6897 FAX : (054)279-6309

* (재)포항산업과학연구원

** (주)경원테크

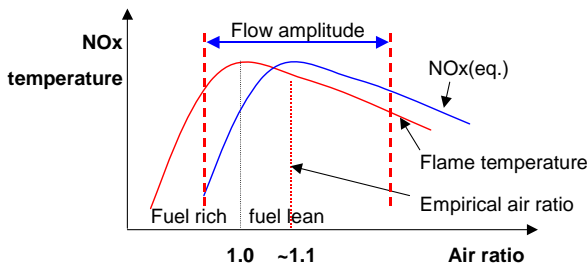


Fig. 1 NOx reduction by oscillating combustion

연료에 주기적인 맥동이 주어지면 축방향으로 연료희박과 연료과잉 조건이 반복적으로 주기적인 유동구조를 갖게 되며 하류로 가면서 그 연료희박과 연료과잉정도가 점차 감소된다. 맥동 연소를 통한 NOx 저감 원리는 다음과 같이 알려져 있다. 공기비 1.0 을 약간 상회하는 연소조건에서 가장 높은 화염온도를 가지며 온도에 민감한 열적(thermal) NOx 도 대량으로 발생된다. 공기비 1.0 부근을 벗어나면 화염온도가 급격히 하락하면서 Fig. 1 과 같이 NOx 도 급격히 하락한다. 즉 연료과잉과 연료희박조건이 주기적인 유동구조를 갖는 맥동연소에서는 평균운전조건인 공기비 1.1 부근이 아니고 NO 가 적게 발생하는 연소조건에서 운전되므로 NOx 발생량이 저감된다.⁽¹⁾ 맥동연소에서 NOx 저감율은 맥동주기(frequency)와 진폭(amplitude), 주기내 연료공급 시간을 의미하는 듀티 비(duty ratio) 등의 함수가 될 것이며, 실 적용 과정에서 혼합물량에 따른 CO 배출량 증대, 화염 소화 및 연소소음이 증가될 수 있기 때문에 적절한 맥동주기와 진폭의 조절이 요구된다.

미 GTI(Gas Technology Institute)⁽²⁾에서는 1996 년부터 2003 년까지 실험실 규모에서부터 철강공장의 실규모 연소로를 대상으로 맥동연소기술을 실증하였다. 이들은 버너업체들의 각기 다른 개념으로 설계된 버너에 맥동연소기술을 접목하였을 때 NOx 저감율과 열전달량 등을 실험적으로 평가하였다. 고주파 맥동류가 이용되는 통상의 맥동연소기술과 달리 맥동이 3Hz 이내의 저주파수이고 진폭인 큰 경우에 실험실 규모의 시험결과에서는 비맥동대비 NOx 배출량이 31~67%까지 저감되며 13%의 열전달 향상효과를 얻었다고 보고하고 있다. 고속분사와 다단연소를 채택한 버너에서는 맥동연소기술의 접목이 유리하지 않다고 보고하고 있다. 래들가열용, 단조로, 소둔로, 용해로, 가열로 등의 버너를 대상으로 field test 를 수행한 결과에서는 28~55%의 NOx 저감과 3~5%의 에너지절감이 가능하였다고 보고하였다. 소음증대, 화염감지 실패, 그리고 소재품질 저하 등의 부작용은 없고 오히려 로내 온도가 균일해지는 장점이 있었다고 보고하고 있다.

연료유동에 인의적 맥동을 주기위해서는 동작이 확실하고 내구성있는 맥동제어밸브가 구축되어야 한다. 이를 위하여 미 GTI 는 두 종류의 맥동제어밸브를 구현하였다. 하나는 SSP 밸브(Solid State Proportioning Valve)⁽²⁾이고 또 하나는 회전식 밸브이다. SSP 밸브는 고정판과 이동판 사이에 탄성물질을 두고 이동판이 아래로 이동하면 탄성물질이 눌러 옆으로 늘어나면서 유체의 이동통로를 막아 유체의 공급을 차단하는 원리를 갖고 있다. 이동판이 위로 이동하면 탄성물질이 줄어들면서 이동통로가 열려 유체가 다시 공급되는 것이다. 이는 김⁽³⁾ 등에 의해 시도된 밸브와 같은 개념이다. SSP 밸브는 맥동주기와 듀티 비 등을 자유롭게 제어할 수 있는 장점은 있으나, 오염된 가스를 사용하는 경우에는 탄성물질이 빠르게 손상될 수 있다. 회전식 밸브(cyclic or rotary flow valve)^(2,4,5)는 배관내에 부분적으로 뚫린 개구부가 있는 회전 디스크와 고정 디스크를 각각 장착시킨다. 회전 디스크를 모터로 회전시킬 때 두 디스크의 개구부가 중첩되면 유체가 공급되고, 개구부가 엇갈리면 유체공급이 중단되는 방식이다. 이는 맥동주기는 바꿀 수는 있지만 듀티 비를 바꾸기 위해서는 회전 디스크의 개구부 크기가 다른 것으로 교체해야 하는 번거로움이 있다.

열처리로는 통상적으로 20cm 이내의 직경을 갖는 다수개의 복사관(radiant tube)이 부착된다. 통상 직관형, U 형, W 형의 복사관이 많이 사용되고 여기에 7~20 만 kcal/h 의 연소용량을 갖는 버너가 설치된다. 복사관 버너에서 공급된 연료와 산화제는 좁은 복사관내에서 연소가 진행되며 연소열에 의해 가열된 복사관에서 방사되는 복사열로 피가열물이 가열된다. 통상 공기는 배가스 현열을 회수하여 250~450°C 로 예열된 상태로 버너에 공급는데, 좁은 복사관내에서 고부하 연소가 이루어지기 때문에 환경규제치에는 만족하지만 가열로 등의 직접가열방식 연소로에 비해 NOx 가 많이 배출된다. 복사관은 버너 토출구에 급확산 영역(sudden expansion)이 거의 없기 때문에 고속 분사법, 다단 연소 등의 저 NOx 연소기술을 접목하여도 배가스의 내부재순환이 없기 때문에 큰 효과를 볼 수 없다. 이에 따라 복사관 버너시스템에서는 향후 강화될 NOx 규제치에 대응하기 위해 타 NOx 제어기술이 요구되는 상황이다.

본 연구에서는 NOx 저감에 유리하다고 알려져 있는 맥동연소기술이 복사관 버너시스템에도 NOx 저감에 유용한가?를 평가하기 위하여 시도되었다. 성능평가는 맥동에 의한 NOx 저감효과, 열전달을 향상과 복사관 온도 균일화 등의 항목분석을 통해 이루어졌다. 이들 성능평가를 위해 1~2 만 kcal/hr 급 연소용량의 시험설비를 구축하고, 회전식 맥동제어밸브를 설계, 제작하였다. 실제 사용되고 있는

복사관보다 적은 연소용량에서의 연소시험이며, 본 연구를 통해 실용화 가능성 등을 평가할 수 있을 것이라 사료된다.

2. 연구내용

2.1 맥동제어밸브

회전식 맥동밸브는 미특허⁽⁵⁾로 원천기술이 선점당한 상태로서 여기서는 회전식 맥동밸브의 특성파악과 맥동연소기술의 응용성을 평가하기 위한 목적으로만 설계, 제작하였다. 밸브 중심에 모터를 장착하고 그 로터(rotor)에 회전디스크를 연결하여 60~300rpm 으로 회전시킬 수 있다. 고정디스크와 회전디스크 사이의 공차 및 가공한계 등으로 개구부가 엇갈린 가스 차단인 경우에도 디스크간 간극을 통해 20~30%의 가스누출이 발생한다. 가스누출을 줄이기 위해 Fig. 2 와 같은 복잡한 구조로 디스크 정렬과 가공을 하였다. 사용된 디스크의 개방각도는 고정디스크 15°, 회전디스크 30°로 되어 있어 듀티 비는 1/12 이다.

본 연구에서는 회전식 맥동제어밸브를 사용하기 때문에 맥동주기 또는 맥동주파수의 표현보다는 회전디스크의 회전수인 맥동회전수(oscillating revolutions per minute)라는 표현을 사용하겠다.

2.2 시험설비와 버너

맥동연소의 성능평가를 위하여 열처리 시험로를 Fig. 3 과 같이 구성하였다. 복사관을 내장한 시험로, 제어판넬, 유로계, 그리고 버너로 구성되어 있는데, 회전식 맥동제어밸브는 버너전단의 연료배관에 부착하였으며, 버너는 탈부착이 용이하게 설치하였다. 연료는 상용 LPG 를 사용하였다. Fig. 4 에서 보는 바와 같이 내경 104mm 의 파이프로 제작된 U 형 복사관이 설치되고, 복사관의 한쪽은 버너가 부착되고 다른 한쪽은 연소가스가 배출되며, 재생기(recuperator)는 설치하지 않았다. 시험로

는 향후 실규모 복사관 버너시스템에 대한 실증을 위해 크게 제작하였는데, 본 연구에서는 복사관에서 양쪽으로 25cm 의 여유공간을 주고 나머지는 막고 단열처리하였다. 복사관 표면에 총 19 개의 K 형 열전대를 부착하여 복사관 표면의 온도분포를 측정하였으며, 로중심에 1 개의 K 형 열전대를 부착하여 시험로의 승온율을 조사할 수 있도록 하였다.

시험용 버너로는 Fig. 5 와 같은 예혼합형 버너가 이용되었다. 연료는 LPG, 연소용량은 15000kcal/h 급으로 버너를 설계하였으며, 연료와 공기는 각기 노즐에서 분사되어 혼합챔버에서 혼합되고 여기서 화염전단이 형성되고 버너 토출구에서 분사된다. 통상의 복사관 버너도 위와 같은 혼합형 구조를

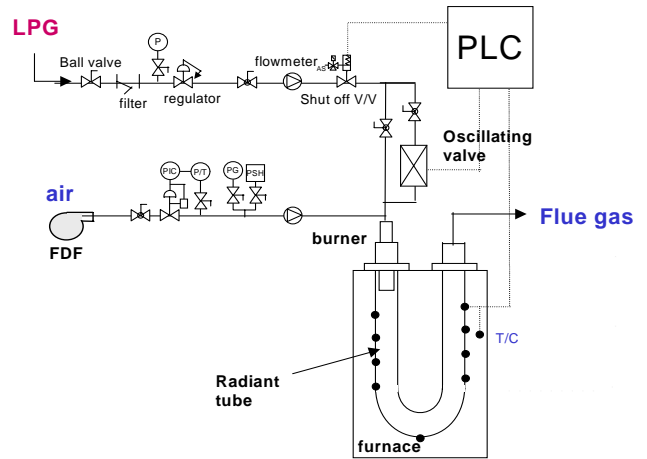


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus



Fig. 4 The inside of test furnace



Fig. 2 Cyclic oscillating control valve

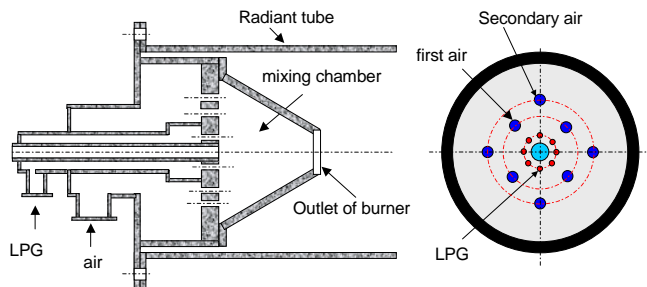


Fig. 5 Schematic diagram of burner

갖고 있는데, 버너 토출구가 작으면 예혼합성이 강한 청염이 나타나고, 토출구가 크면 청염이 적고 화염후단에 휘염이 많이 나타난다. 토출구가 없는 경우에는 복사관내에서 화염이 소화된다.

2.3 시험방법 및 조건

맥동연소에서 이상적인 유동패턴은 Fig. 6 과 같다. 즉 기본적인 유량(Ao)이 있고 밸브가 개방되면 맥동진폭(A-Ao)만큼 유량이 증가되며, 밸브가 차단되면 기본유량만 공급된다. 실제 맥동류로 공급되는 연료는 압축성 유체이기 때문에 Fig. 6 과 같이 나타나기는 어렵다. 본 연구에서 사용한 회전식 맥동제어밸브에서는 기본 유량이 누출정도인 총 연료유량의 20~30%가 된다. 밸브가 차단 상태에서 완전 개방되는 시간과 개방 상태에서 차단되는 시간은 회전디스크가 고정디스크 개방각도인 15° 만큼 돌아가는 시간만큼이다. 즉 유량변동과정은 Fig. 6 과 같은 무한대의 응답속도를 갖는 램프파(ramp wave)가 아니고 선형적 증대와 선형적 감소로 구성된다. 물론 맥동제어밸브에서 연료유량이 이상적인 Fig. 7 의 유량 사이클을 갖는다고 하여도 버너노즐까지 가면 그 변동성의 선명성이 저하되면서 사인파의 모습을 갖을 것이다.

맥동주기를 T_w , 밸브개방 시간을 T_e 라고 하면 듀티 비는 T_e/T_w 가 된다. 맥동연소에서는 듀티 비가 크면 밸브의 개방시간이 커서 맥동진폭이 작아도 되지만, 듀티 비가 작은 경우에는 짧은 밸브개방시간에 평균연료유량을 맞추기 위해 맥동진폭이 증가되어야 한다. 즉 연료공급압력을 높여야 한다. 맥동연소에서는 연료유량을 정확히 측정하기 어려운데, 본 연구에서는 배가스내 산소유량을 측정하여 맥동이 없는 경우와 ±0.1%이내의 오차가 되도록 연료압력을 조절한 후 시험분석을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 화염모습 평가

맥동이 없는 경우와 맥동이 있는 경우의 화염 모습은 Fig. 7 과 같다. Fig. 7 은 버너를 복사관에

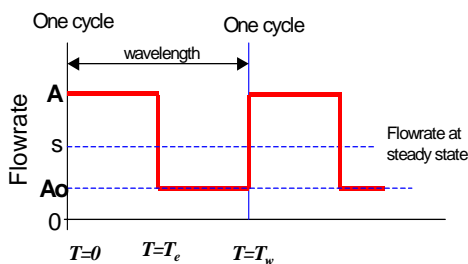


Fig.6 Ideal flow rate cycle of oscillating combustion

탈착한 후 외부에서 화염을 촬영한 것이다. Fig. 7(a)의 맥동이 없는 경우에는 혼합챔버내에서 형성된 화염이 버너 토출구를 통해 배출되며 휘염의 모습을 보여준다. 맥동이 있는 Fig. 7(b)에서 기본유량일 때에는 맥동이 없는 경우와 같은 청염으로 존재하며, 밸브가 개방되어 연료유량이 증가하면 휘염이 급격히 방출되며, 밸브가 차단되어 연료유량이 다시 기본상태로 가면 방출된 휘염이 소멸되면서 청염의 상태로 돌아간다. 맥동회전수가 높아지면, 즉 모터 회전수가 증가되면, 휘염이 완전히 사라지지 않은 상태에서 다음 휘염이 방출되는 모습을 볼 수 있다.

3.2 NOx 저감을 평가

복사관 버너시스템에 맥동연소기술을 접목하였을 때 NOx 저감성능을 평가하였다. 이를 위하여 시험로를 750°C 로 가열한 상태에서 배가스 스택에 가스 샘플링 프루브를 삽입하여 가스를 샘플링하고 이를 Madur 사와 Testo 사의 가스분석기를 이용하여 가스 성분을 분석하였으며, 분석결과는 10 초에 한번씩 저장하였다. 실험은 먼저 맥동이

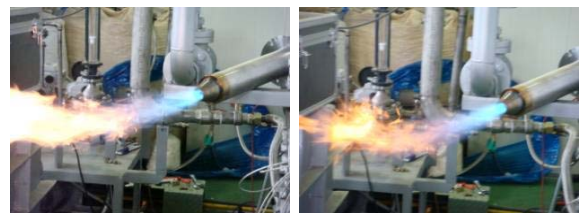


(a)Without oscillation



(1)basic flowrate

(2)valve opening



(3)fully opened

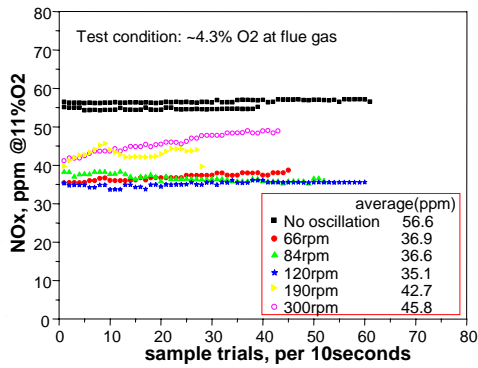
(4)valve closed

(b)With oscillation

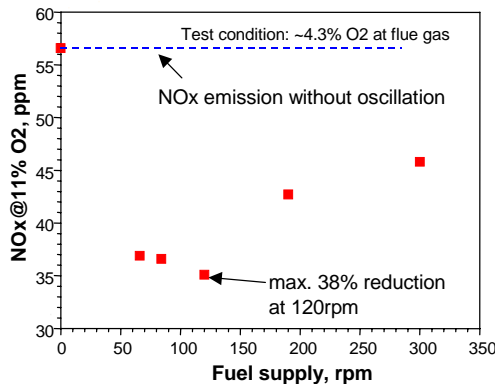
Fig. 7 Photograph of flame with and without oscillation of fuel flow rate

없는 경우의 NOx 배출량과 산소농도를 저장하며, 이후 맥동회전수를 변경해 가면서 시험하는데, 맥동 회전수에 따라 변동하는 배가스내 산소농도를 맥동이 없는 경우의 산소농도가 같도록 연료공급 압력을 조절하고 그 값이 안정된 후에 NOx 분석 데이터를 저장하였다. 분석 결과는 Fig. 8 과 같다.

Fig. 8(a)는 맥동제어밸브의 맥동회전수에 따른 배가스내 NOx 배출량 측정값을 11% O2 기준으로 변환하여 도시한 것이다. 11% O2 기준으로 NOx 배출량을 재조정하는 것은 실제 연소로의 NOx 규제치가 11% O2 기준으로 되어 있기 때문이다. 시험조건은 배가스내 산소농도가 4.3%이고 공기유량은 28Nm³/h 이다. 맥동이 없는 경우는 53~58ppm 의 NOx 가 배출되었다. 연료에 맥동을 주게 되면 맥동회전수에 따라 전체적인 NOx 배출량이 크게 변화되었다. 하지만 각각의 맥동조건에서 NOx 배출량은 크게 변화되지 않음을 알 수 있었다. 이는 맥동주기가 1 초이내로 짧지만 분석기에서 배가스를 샘플링하고 이를 분석하는데 소요되는 시간분해능이 늦기 때문이다.



(a) NOx emission histories at several with oscillating revolutions per minute of fuel flow rate



(b) Effect of oscillating revolutions per minute on average NOx emissions

Fig. 8 NOx emission characteristics with oscillating revolutions per minute of fuel flow rate

Fig. 8(b)는 맥동회전수별 NOx 배출량 평균을 도시하였다. Fig. 9(a)의 값을 합하여 샘플수로 나눈 것으로 시간평균의 개념을 갖는다. 저주파수인 66~120rpm(1.1~2.0Hz)에서는 NOx 가 30%이상 저감되었으며, 120rpm 에서 최대 38%까지 저감됨을 알 수 있었다. 그러나 맥동회전수가 190rpm 이상에서는 NOx 저감효과가 떨어졌다.

Fig. 9 는 맥동연소에 의한 NOx 저감 특성의 재현성 확인을 위하여 산소농도가 4.9~5.1%인 경우에 대하여 시험하고, 그 결과를 11% O2 기준에서 맥동회전수별 NOx 배출량 평균으로 도시한 것이다. 여기서도 90~120rpm 은 30%정도의 NOx 저감이 가능하였으며 90rpm 에서 최대 33%까지 저감되었다. 즉 공기비가 바뀌어 배가스내 산소농도가 변화되면 최대 NOx 저감율 보이는 맥동회전수가 변동될 수 있음을 알 수 있다. 이로부터 실적용시에는 버너특성 및 운전조건에 따라 맥동회전수가 바뀌어야 함을 알 수 있었다.

미 GTI 의 연구결과에서는 실험실 규모에서 28~55%의 NOx 저감이 가능하다고 하였는데, 본 연구의 결과도 그 범위에 들어감을 알 수 있었다. 이로서 맥동연소기술이 복사관 버너시스템에도 NOx 저감의 효과가 있음을 확인할 수 있었다. 또한 맥동회전수가 작아 연료공급변동이 크면 버너구조에 따라 CO 가 다량으로 발생할 수 있다는 미 GTI 의 연구결과와 달리 본 연구에서는 각 조건에서 60ppm 정도의 CO 가 배출되었으며, 맥동회전수에 따른 차이는 없었다. 이는 버너가 예혼합형 버너구조이고 복사관의 길이가 총 4m 로 길어 완전 연소가 이루어지기 때문으로 사료된다.

맥동회전수가 빨라지면 NOx 저감효과가 점차 감소되어 맥동회전수 200rpm(~3.4Hz)이상에서는 맥동연소에 의한 NOx 저감효과가 크지 않았다. 이

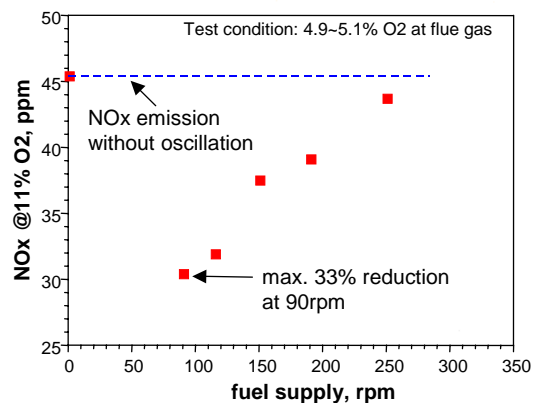


Fig. 9 Effect of oscillating revolutions per minute on average NOx emission

는 밸브가 개방되어 연료가 많이 공급되면 회염이 분출되고 밸브차단시 다시 청염의 기본형태로 돌아가는데 맥동주기가 짧아지면(맥동회전수가 많아지면) 분출되어 기본형태로 가는 회염의 끝부분이 다음 분출회염의 선단부와 합체되면서 맥동의 효과가 사라지는 것으로 사료된다.

3.3 가열성능과 복사관 온도분포

맥동연소의 전열성능을 평가하기 위하여 맥동이 없는 경우와 있는 경우에 시험로의 승온패턴을 분석하였다. 동일한 조건(배가스내 산소농도 4.8%, 공기량 28Nm³/h)을 위하여 배가스내 산소농도를 지속적으로 측정하여 오차를 최소화하였으며, 로 중심에 있는 K 형 열전대의 온도를 시간에 따라 저장하였다. Fig. 10 은 100°C 에서 720°C 까지의 시험로 승온곡선을 도시한 것이다. 맥동이 없는 경우는 승온에 3.30 시간이 소요되나, 맥동회전수가 120rpm (2Hz)인 경우에는 2.92 시간만에 720°C 에 도달하였다. 약 0.4 시간이 단축된 것으로 열전달이 11.5%가 향상되었다.

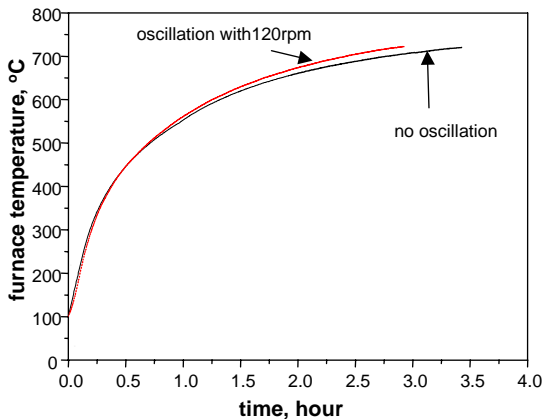


Fig. 10 Furnace temperature histories with and without oscillation of fuel flow rate

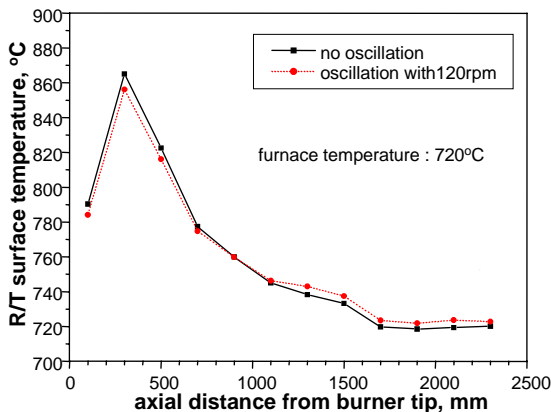


Fig. 11 Surface temperature distribution of radiant tube

미 GTI 에서는 소형설비에서는 13% 정도, oxyfuel 버너는 25%, 고온공기 혼합노즐 버너는 13%, 그리고 실규모 설비에서는 통상적으로 3~5%의 열전달 향상이 있었다고 보고하고 있는데, 본 연구는 소형 시험설비이므로 GTI 결과와 비슷한 수준의 열효율향상 결과를 얻었다고 할 수 있다. 하지만 열전달 향상 효과는 버너와 연소로의 구조와 연소 조건에 따라 차이가 있을 것으로 사료된다.

Fig. 11 은 맥동유무에 따른 복사관 온도 균일화 정도를 파악하기 위하여 로온 720°C 에서 버너토출구에서 복사관 말단부까지의 복사관 표면온도분포를 도시한 것이다. 복사관 표면에 부착된 총 19 개의 열전대중 동축상에 있는 열전대 12 개의 온도를 선택하여 도시한 것이다. 버너 토출구 부근보다는 다소 떨어진 약 300mm 부근에서 로온대비 140°C 이상인 860°C 의 최고온도를 보이며, 이후 점차 하락한다. 이로부터 화염은 약 300mm 부근에서 복사관표면과 접촉됨을 알 수 있다.

맥동유무에 따른 차이를 보면, 맥동이 없는 경우대비 맥동이 있는 경우에 최고온도 부위인 300mm 에서 5°C 이상 낮고 1200mm 이후의 저온영역에서는 더 높은 것을 알 수 있다. 즉 맥동연소는 고온부의 온도하락, 저온부의 온도상승을 유도하여 복사관 온도분포를 다소 균일하게 함을 알 수 있었다. 이로부터 복사관의 열응력을 다소 낮아 저감시켜 복사관의 수명을 연장할 수 있다는 결론을 얻을 수 있다.

4. 결 론

맥동연소기술을 복사관 버너시스템에 접목하였을 때의 NOx 저감, 열전달 향상, 그리고 복사관 온도 균일화 등을 평가하기 위하여 소형 복사관 맥동연소시험설비를 구축하였다. 예혼합성의 버너와 회전식 맥동제어밸브를 자체 설계, 제작하여 그 성능시험을 수행하였으며, 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 복사관 버너시스템에서 맥동연소가 NOx 저감에 유용함을 확인하였다. 맥동회전수 90~120rpm 에서 최대 38%의 NOx 저감이 가능함을 확인하였다. 그러나 190rpm 이상에서는 맥동연소 효과가 크게 감소함을 알 수 있었다.
- (2) 맥동연소에 의해 열전달이 증가됨을 확인하였다. 빨라진 전열효과에 의해 열효율 향상 및 에너지절감도 가능할 것이다.
- (3) 복사관 표면온도가 균일해짐을 확인하였다. 복사관내 최고온도가 낮아지는 것으로부터 복사관의 수명이 다소 연장될 수 있을 것이라 사료된다.

후 기

본 연구는 2006 년 산업자원부 에너지관리공단 에너지자원기술개발사업(2006-C-CC02-P-01)을 통해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 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.
- (2) NO_x Emission Reduction by Scillating Combustion, 2004, GTI Project No. 61111, Final Report.
- (3) Kim, K. S. and Kim, H. U., 2004, "Flame Characteristic Study of Oscillating Combustor with Valve Operation," *KOSCO*, Vol. 9, pp. 36~43.
- (4) Charon, O., Jouvaud, D. and B. Genies, 1995, "Pulsating O₂/Fuel Flame Asa New Technique for Low NO_x Emission," *Combustion Technologies for a Clean Environment*, Vol. 1, pp. 211~222.
- (5) US Patents No.6085786, 2000.