

고속분사를 이용한 소형 축열식 복사관 버너시스템의 성능평가

조한창** · 조길원*, 이용국*

Performance Estimation of Small Regenerative Radiant Tube Burner System using High Velocity Discharge

Han Chang Cho**, Kil Won Cho*, Yong Kuk Lee*

ABSTRACT

An Experimental study was conducted on spray combustion using dual swirlers at different outlet angle; co-swirl and counter-swirl. To understand the characteristics of turbulent spray combustion of dual swirl flow (DSF), the axial helical annular vaned swirlers with various swirl ratios and combination of angle and direction were designed. and temperature measurements of a rapidly thermocouple insertion and measurements of soot volume fraction and microrstructure using thermophoretic sampling particle diagnostic (TSPD) as TEM were carried out. The NO_x, CO₂, O₂, etc. was analyzed using emission gas analyzer. The results show that flame stability were maintained under very lean condition. for both co-swirl and counter-swirl case. And though Counter-swirl case kept the higher temperature region compared to co-swirl case, Counter-swirl combustion represented less NO_x emission and soot formation than co-swirl case.

Key Words : Dual swirl flow, Co-swirl, Counter-swirl, Thermophoresis, TEM, NO_x, Soot, Soot volume fraction, Aggregate

1. 서 론

축열연소시스템은 고온화된 공기를 이용하기 때문에 기존의 통상적인 저 NO_x 연소기술을 이용하여도 NO_x가 증가하는 경우가 많다. 많은 연구를 통해 축열연소시스템에 범용으로 적용되는 저 NO_x 연소기술은 공기를 고속으로 분사하는 방법이다. 이는 공기를 상온기준 30m/s이상, 즉 축열연소시스템에서 통상 예열되는 900°C인 경우 90m/s의 평균유속으로 분사된다. 강한 전단류의 의해 재순환된 후류의 배가스가 원활히 흡입(entrainment)되어 산소농도가 저하되고 화염의 인장(flame stretch) 증가에 따른 반응물저하로 화염온도 저하를 유도하여 NO_x 발생을 억제하게 된다.[1][2] 이는 직접가열방식의 가열로 등에

현재 다수 이용되고 있다. 그러나 좁은 복사관내에서 연소반응이 종결되는 축열식 복사관 버너에서는 일본의 NFK 사 제품 이외에는 크게 응용되지 못하고 있다.[3] 이는 좁은 연소영역을 갖고 있어 배가스의 원활한 재순환이 이루어지지 못해 배가스의 흡입이 제한되기 때문에 제약을 받는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 축열식 복사관 버너시스템을 개발하고 실용화하기위하여 고속분사법을 채택한 연소시험용 소형 축열식 복사관 버너를 설계, 제작하고 그 성능시험을 수행하였다. 이를 통해 축열식 복사관 버너시스템의 실적용성을 평가해 보고자 한다.

2. 시스템 설계 및 실험

소형 축열식 복사관 버너시스템은 Fig.1과 같은 구성을 하고 있다. 시스템은 크게 유로부분,

* 포항산업과학연구원 에너지연구팀

† 연락처자, hccho@rist.re.kr

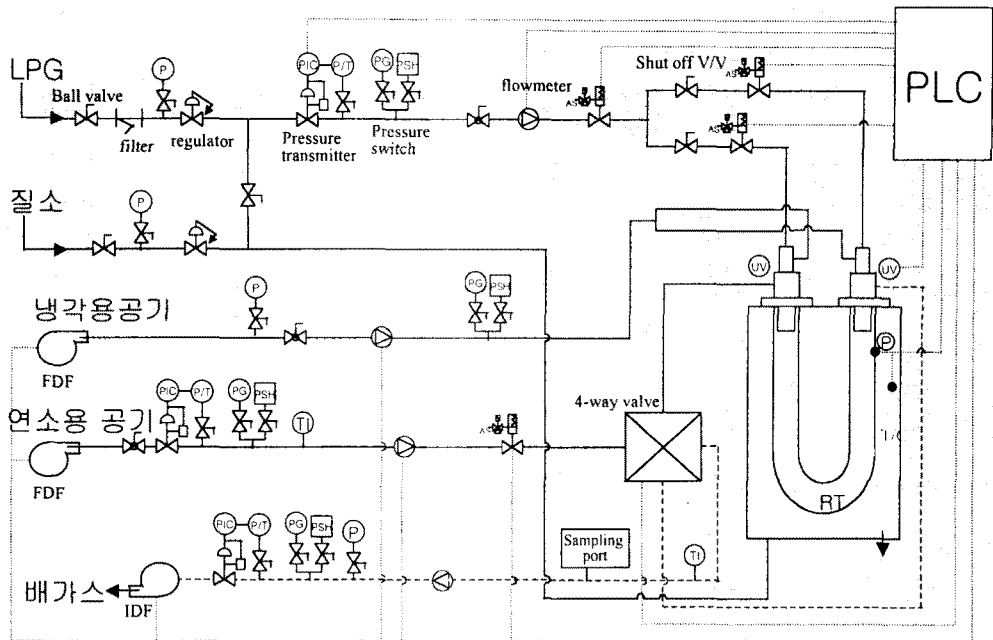


Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

로부분, 그리고 연소절환부분으로 나눌 수 있다. LPG 또는 LNG를 연료로 사용하고 공기는 연료 공급 파이프의 소손을 방지하기 위한 냉각용 공기와 연료의 연소를 위한 주 연소용 공기가 강제팬(fan)을 통해 공급된다. 복사관내 발생한 연소 배가스는 흡입팬(Induced Draft fan)을 통해 배출된다. 각기 배관에는 유량계와 압력스위치 등이 부착되어 유량과 압력을 알 수 있도록 되어 있다. 축열연소시스템의 특징인 연소절환을 위하여 연료는 솔레노이드 밸브를 이용하여 절환시키고 공기와 배가스의 절환은 사방변(four way valve)를 이용한다. 시험로에는 U형 복사관을 장착하였으며, 입구부에는 버너가 1대씩 장착된다. U형 복사관은 100A(id 100mm), 길이 1540mm, 튜브간 간격 210mm이며, 로내 삽입길이는 1140mm로서 SUS310을 재질로 제작되었다.

축열식 복사관 버너는 Fig.2와 같이 설계되었으며, 혼합지연을 통한 NOx 발생량 억제율을 위해 공기를 고속으로 분사하도록 하였으며 연료와 공기 노즐을 멀리 설치하였다. 버너에는 냉각용 공기 노즐과 연소용 공기 노즐이 있다. 냉각용 공기는 연소절환과정에서 고온 가스에 의한 소손을 방지하기 위하여 계속적으로 공급되며, 여기에는 연료파이프와 노즐, 화염착화를 위한 electric rod, 화염감지를 위한 UV형 화염감지기 등이 설치되었다. LNG와 LPG 등의 연료는 24m/s(상온 30°C 기준)으로 공급되도록 하였다. 버너당 총 공기량의 5%를 차지하는 냉각용 공기는 43cm/s(상온기준)으로 공급된다. 연소용 공기는 냉각용

공기 노즐에서 가장 먼 하단에 세 개의 홀로 구성되어 있는데 중앙의 큰 원형노즐을 통해 공기의 60%, 나머지 두 개의 원형 노즐을 통해 40%의 공기가 공급되도록 하였다. 공기비 1.15를 설계기준으로 공기가 상온에서 32m/s로 분사되도록 구성하였다. 버너후단에 버너와 일체형으로 구성되는 축열기에는 직경 13mm의 세라믹 볼을 4-5kg 넣었으며, R/T 중심간 거리가 좁아 축열기 전단은 버너전면과 같이 좁은 단면적을 갖지만 후단으로 가면서 어느정도 넓어지도록 되어 있다.

축열식 복사관 버너시스템의 연소용량이 2만 kcal/hr으로서 실험조건은 Table 1과 같다.

Table 1 Experimental conditions

fuel	LPG	LNG
fuel flowrate	0.91Nm ³ /hr	2.1Nm ³ /hr
cooling air flowrate	1.2Nm ³ /hr /버너당	1.1Nm ³ /hr /버너당
combustion air flowrate	26.2-28.0 Nm ³ /hr	23.0-24.0 Nm ³ /hr
air ratio	1.26-1.34	1.20-1.24

절환시간은 40초로 설정하였으며, 정상적인 경우 연료는 절환 1초전에 공급이 중단되고 절환 1초후 공급되도록 하였다. 그러나 연소제어가 ON/OFF 시간비례제어 방식이기 때문에 로온이 설정치와 근접하거나 설정치보다 높은 경우에는

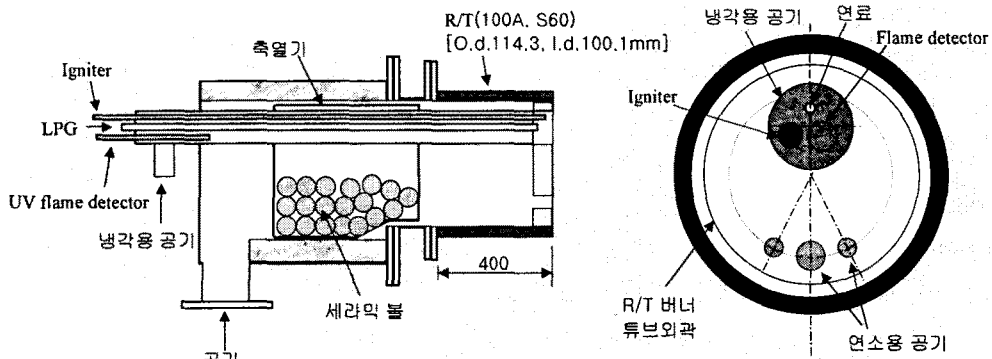


Fig. 2 Regenerative radiant tube burner

연료 공급이 정상적인 공급중단시간보다 훨씬 이전에 중단될 수 있다.

시스템 운전중 배관내 압력손실의 불균형, R/T 및 축열기 등에서의 온도불균형 등으로 버너간 연료/공기의 공급량이 다소 차이가 발생하기도 하였다. 연료의 경우는 솔레노이드 밸브 후단에 있는 밸브의 개도를 조절함으로써 그 유량을 동일하게 조정할 수 있었으나 공기의 경우에는 별도의 밸브가 설치되지 않기 때문에 다소의 유량 차이를 감수해야 한다.

축열식 복사관 버너시스템의 연소시험을 통해 NOx 배출량, R/T 온도분포, 축열체양의 적정성, 연소시스템의 로온 추종성 등의 성능과 버너시스템에서의 압력분포를 측정, 평가하였다.

가 지속적으로 공급되지 않고 더구나 절환되기 때문에 시간에 따라 NOx 및 산소 농도가 계속적으로 변동하게 된다. 이에 따라 절환과정에 관계없이 산소농도와 NOx 배출량을 동시에 측정하고 이를 가지고 전체적인 경향을 평가하였다.

Fig.3은 LPG를 연료로 로온이 800℃이상인 경우에 로온에 따른 NOx 배출량을 도시한 것이다. 전체적인 로온 상승에 따라 NOx가 지속적으로 증가되는데, 특히 1000℃이상의 고온에서는 순간적으로 200ppm (9.8% O2 기준)이상의 값을 보이기도 하였다. 그러나 on/off 시간비제어 방식의 연소제어에 의해 연료공급이 중단되고 공기만 공급되는 상태가 지속될 수 있는데, 그러한 경우에는 산소농도가 14%이상의 높은 값을 갖고 그때의 NOx 배출량을 100ppm이하였다.

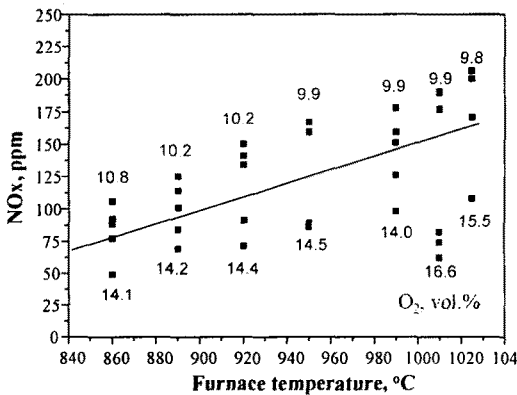


Fig.3 NOx emission with LPG

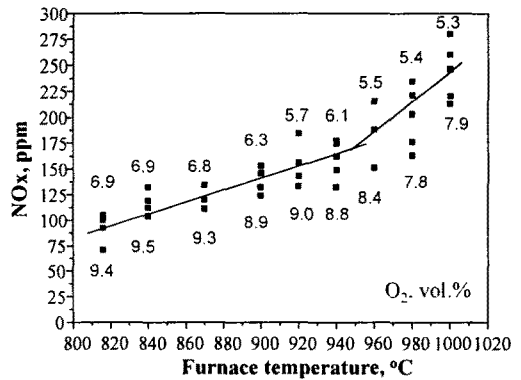


Fig.4 NOx emission with LNG

3. 결과 및 고찰

3.1 NOx 배출특성

축열식 복사관 버너에서 NOx 배출량은 흡입철펜 전단의 샘플링 포트를 통하여 배가스 일부를 진공펌프로 흡입하고 이를 NOx 분석기 (Madur-40T series)로 측정하였다. 연료와 공기

이상의 결과로부터 진공침탄로의 운전조건인 900-1000℃ 에서도 11% O2 기준시 순간 최고 배출량이 184ppm, 시간평균으로 산출하면 160ppm 이내로 제어되었다. NFK 사의 축열식 복사관 버너를 포스코 시험로에서 실험한 결과를 보면 NOx가 138-277ppm(11% O2 기준, LNG)정도 측정된 바 있다. 본 연구의 축열식 R/T 버너

가 NFK사의 버너보다 적은 양의 NO_x가 발생하는 것을 알 수 있다.

LNG를 연료로 한 경우의 NO_x배출량을 Fig.4에 도시하였다. LPG를 연료로 한 시험결과와 유사하게 로온 상승시 NO_x 발생량을 점차 증가되며 로온이 950℃ 이상인 경우에 좀 더 급격한 구배를 갖는다. 또한 LPG를 연료로 한 경우에 비해 낮은 공기비에서 시험된 관계로 배출가스내 산소농도가 다소 낮고 부피기준의 NO_x 발생량이 1000℃ 로온에서 최대 270ppm까지 발생하는 것을 볼 수 있다. 이를 11% O₂ 기준으로 환산하면 170ppm 수준이 되며 이는 환경규제를 만족하는 수치로서 LPG를 연료로 한 경우와 크게 다르지 않음을 알 수 있다.

3.2 복사관 표면에서의 온도분포

복사관내 연소상태와 로온 균일성 등을 평가하기 위하여 복사관 표면에 여러 개의 K형 열전대를 부착시켜 온도를 측정하였다. 버너의 연료노즐이 복사관 상단에 위치하고 연료/배가스의 공급 및 흡입위치가 복사관의 하단에 위치하므로 열전대는 복사관의 상하면에 동일축상에 설치하였다. 열전대의 부착깊이와 로에 노출된 열전대의 면적비 등에 따라 온도오차가 다소 발생할 수 있으나 그에 온도보정은 하지 않았다. 온도는 데이터 로거를 통하여 1초단위 실시간 순시치 데이터를 받아 저장하였다.

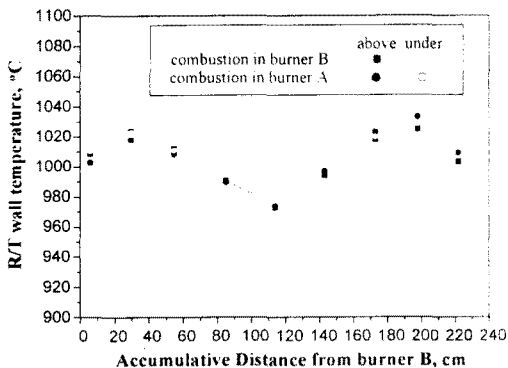


Fig.5 Surface temperature of radiant tube (fuel: LNG)

LNG를 연료로 한 연소시험시 얻어진 복사관 표면온도분포를 Fig.5에 도시하였다. Fig.5는 절환되기 직전의 온도분포를 도시한 것이다. Fig.5에서 복사관의 직관부 중심부에서 최고온도가 얻어지며, R/T 곡관부에서 가장 낮은 온도가 얻어졌다. 연소버너쪽의 직관 복사관이 축열버너쪽의 직관 복사관보다 높은 온도를 갖게 되는데 이는 절환에 의한 것이므로써 절환되면서 대칭적인 온

도분포를 갖게 된다. LPG를 연료로 사용한 경우와 동일한 경향이 얻어지며, 위와 같은 온도분포는 타 연구에서 얻은 결과와 동일하다고 할 수 있다. 복사관 표면의 온도편차가 40-60℃ 이내 있으며 이는 통상의 recuperator식 복사관 버너 시스템에 비해 월등히 양호한 결과이다.

통상적으로 다수의 R/T를 장착한 연소로에서는 R/T 표면의 온도편차가 완화된다. 본 연구와 같이 1기의 R/T를 실험로에 장착하여 테스트한 결과에서 나타나는 온도편차가 다수 개의 R/T가 장착되는 공업로에서는 그 편차가 완화되므로 실제 운전에서 문제가 없을 것이라 사료된다.

3.3 축열기의 성능평가

본 연구의 축열식 복사관 버너에 장착된 축열기는 Fig.2에서 보는 보와 같이 버너와 일체형으로 제작하고 이곳에 직경 13mm의 세라믹 볼을 4-5kg을 넣었다. 이때 세라믹 볼의 양은 축열기내 열유동 해석코드로부터 얻은 결과로부터 유추하였다.

Fig.6은 LPG를 연료로 세라믹 볼을 5kg 사용하였을 때 로온이 1000℃ 이상인 경우에 얻은 축열기 전후단의 실시간 온도이다. 로온에 비해 축열기에 공급되는 배가스 및 공기의 예열온도가 550-830℃, 500-750℃로 로온에 관계없이 상당히 낮음을 알 수 있다. 또한 배가스의 배출온도 및 공기의 유입온도가 100℃ 내외로 매우 낮음고, 버너 A와 B의 절환연소시 상당한 온도차가 관찰되었다.

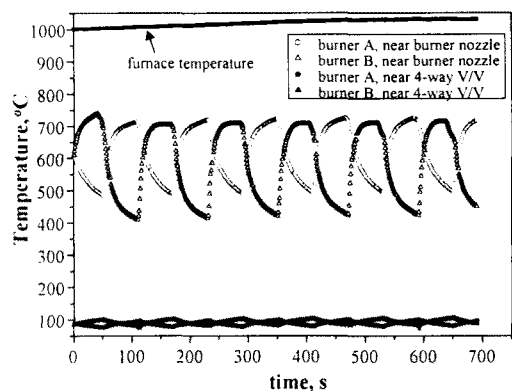


Fig.6 Temperature histories in regenerator

로온에 비해 축열기에 공급되는 배가스 온도가 낮은 것은 (1)버너입구부터 축열기 전단까지의 거리가 45cm로서 상당히 긴데 이곳의 벽면을 통한 배가스의 열손실, (2)계속적으로 공급되는 냉각용 공기에 의해 냉각된 냉각용 공기 공급용

파이프와의 열전달, 그리고 (3)축열용 버너, 즉 비연소 버너에 공급되는 냉각용 공기가 고온의 배가스와 혼합되어 그대로 축열기를 통과, 배출되면서 배가스의 온도를 저하시켜 배가스 온도가 급격히 낮아진다고 사료된다. 배가스의 온도저하를 방지하기 위해서는 냉각용 공기 공급용 파이프를 소구경의 파이프로 대체하거나 냉각용 공기의 공급량 감축 등이 있다.

축열기에 유입되는 배가스온도가 축열기 설계시에 비해 100°C이상 낮아졌기 때문에 설계에 비해 낮은 배가스 배출온도와 공기의 예열온도가 실측되었다. 배가스의 유입온도를 높이지 못한다면 축열체 양을 감축시켜야 한다.

3.4 On/off 시간비례 제어방식의 연소제어

ON/OFF 시간비례제어 방식을 통한 연소제어는 연료를 계속적으로 공급하지만 그 유량을 제어하는 유량제어방식과 달리 고정된 연료유량의 공급시간을 조절하는 방식으로써 하나 또는 두개의 연소용량을 갖는 버너시스템에 대하여 적용이 용이하고 별도의 유량계와 고가의 콘트롤 밸브가 사용되지 않고 하나의 차단변과 PID 제어가 가능한 컨트롤러가 필요하다. 본 과제의 축열식 복사관 버너시스템에는 on/off 시간비례제어 방식이 Fig.7의 개념으로 적용되었다.

로내 대표온도를 열전대로부터 받고 로온 설정치와의 차이를 적산하기 위한 별도의 PID 제어를 설치하여 feedback 제어방식의 로온 제어회로를 구성하고 제어기의 출력을 기본으로 하여 연소시간을 결정하도록 하였다. 축 비례제어의 출력 100%대비 현 사이클에서의 제어기 출력치의 비율에 따라 다음 연소사이클의 연소시간, 즉 연료공급시간을 결정하도록 하였다. 적분시간은 두 번 절환되는 하나의 사이클에서 비연소시간(한번의 절환당 2초)을 제외한 연소시간만을 대상으로 하였다.

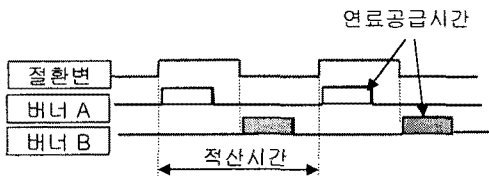


Fig.7 On/off time control method for combustion control

Fig.8은 로온 791°C에서 로온 설정치를 744°C로 하였을 때의 로온 이력률 추적한 것이다. 로온이 추정치를 대략 10분정도면 추종하는 것을 알 수 있었다. 본 실험에서는 단열된 실험로에서

온도하강실험을 수행한 것이어서 상대적으로 온도추종시간이 길었다고 사료되지만 비교적 잘 추종한다고 할 수 있다. 이로부터 on/off 시간비례 제어 방식을 통한 로의 온도제어가 유용함을 확인할 수 있었다.

3.5 고찰

축열기 전단의 온도로부터 축열기에 유입되는 배가스의 온도가 800°C 정도로 낮았다. 이는 위에서 설명하였듯이 비교적 큰 구경의 냉각용 공기 공급 파이프와 벽면으로의 열손실, 냉각용 공기가 배가스와 혼합되면서 배가스의 유량은 다소 증가하지만 온도를 하락시키면서 배출되기 때문이다. 냉각용 공기 5%가 배가스와 혼합되면서 30-40°C 정도의 온도저하를 유발하는 것으로 예측된다. 동일한 축열기를 이용할 때 축열기로의 배가스 유입온도를 상승시키기 위해서는 냉각용 공기 공급 파이프의 구경 축소 및 냉각용 공기의 유량 축소 등을 들 수 있다. 복사관내 화염 부착 여부를 검출하기 위하여 UV형 화염감지기가 냉각용 공기 공급파이프내 삽입되어 있으며, 화염감지기가 80-100cm 앞의 화염을 냉각용 공기 공급 파이프를 통해 감지해야 하기 때문에 파이프의 구경 축소가 쉽지 않다. 더구나 냉각용 공기 공급파이프에는 electric rod와 연료공급파이프가 삽입되어 있으며 이들 파이프의 과열을 방지하기 위해서는 서로 닿지 않도록 제작되어야 하는 제약으로 한계가 있다. 냉각용 공기의 유량 감소는 어느 정도 가능할 것이라 사료되나 과도한 유량 감소는 냉각용 고기 공급 파이프의 열화, 소손이 유발될 수 있어 다수의 테스트를 통하여 엄밀히 할 필요가 있다.

버너시스템의 축열기에서 얻어진 온도효율과 배가스의 배열회수율은 식(1)과 (2)로부터 계산할 수 있다.[4] 실험결과로부터 배가스 유입온도를 750°C, 공기의 유입온도를 100°C, 공기의 예열온도를 620°C 등의 평균온도를 산정하면, 온도효율은 80%이 된다. 유효 배열회수율은 공기와 배가스의 최저 온도를 기준으로 배가스에서 회수가 가능한 유효 현열과 실제 공기를 통해 회수된 현열을 의미하며, 여기서는 공기와 배가스의 최저 온도를 0°C로 가정하였다. 이를 통해 얻은 유효 배열회수율은 69.3%였다.

$$\eta_t = \frac{T_{Ao} - T_{Ai}}{T_{Ei} - T_{Ai}} \quad (1)$$

$$\eta_n = \frac{m_A (c_{p, Ao} T_{Ao} - c_{p, Ai} T_{Ai})}{m_E (c_{p, Ei} T_{Ei} - c_{p, Ei} T_{Ai})} \quad (2)$$

이때 하첨자 A는 공기, E는 배가스, i는 축열기

입구측, α 는 축열기 출구측을 의미한다. m 은 질량기준의 유량(kg/hr), c_p 는 비열을 의미한다.

between heat transfer efficiency and pressure drop, vol.25, pp.319-329, 2001

4. 결 론

연소가스의 현열을 회수하여 연소용 공기를 고온으로 예열시키는 에너지 절약형 축열연소기술을 소형 복사관 버너에 적용하고 그에 대한 연소시험을 통해 NOx 배출량, 복사관 표면의 온도편차, 축열기의 성능, 로온 제어 능력 등을 평가하여 다음의 결론을 얻을 수 있다.

(1)연료-공기를 분리, 고속분사하는 혼합지연형 축열식 버너를 설계, 제작하였으며, 실험으로부터 NOx 배출량이 1000℃이상의 로온에서도 시간평균으로 160ppm(11% O₂ 기준, LPG 사용시) - 170ppm(LNG 사용시)에서 관리됨을 확인함으로써 저 NOx 성능이 매우 우수함을 확인하였다.

(2)복사관 표면온도가 1000℃이상의 로온에서도 40-60℃이내의 온도편차를 갖고 있었으며, 타지점에 비해 버너부근의 냉각용 공기 공급구가 있는 위치가 가장 낮은 온도분포를 갖고 있었다. 축열식 R/T 버너시스템의 적용시 버너면에서 공기노즐이 있는 위치가 피열물과 직접 마주치게 할 수 있도록 하고 냉각용 공기 공급구가 있는 위치가 피열물을 직접 마주치지 않도록 설치하도록 하는 것이 유리할 것이라 사료된다.

(3)on/off 시간비례 제어방식을 통한 연소제어를 수행하여 로온이 설정치를 안정적으로 추종함을 확인하였다. 연소제어의 복잡성을 어느정도 해소한 on/off 시간비례 연소제어법이 축열식 R/T 버너시스템에 응용가능함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단의 “에너지절약기술 개발사업 중대형과제”사업의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Tomeczek, J., Goral, H., and Gradon, B., Combustion Science and Technology, Vol.105, p.55, 1995
- [2] Tomeczek, J., Goral, H. and Gradon, B., GASWARME International, vol.47, p.261, 1998
- [3] NFK, CHUGAIRO, TOKYO GAS 등, 축열식 Radiant Tube 버너 카탈로그
- [4] F. Duprat and G. L. Lopez, Comparison of performance of heat regenerators: Relation