

공기다단 적용 석유코크스 연료 전용 연소기에 대한 실험적 연구

권민준* · 이창엽** · 김세원***

*한양대학교 기계공학과

**한국생산기술연구원 고온에너지시스템연구실용화그룹

An Experimental Study of Petroleum Cokes Air Staged Burner

Minjun Kwon*, Changyeop Lee** and Sewon Kim***

*Department of Mechanical Engineering, Hanyang University

**Thermochemical Energy System R&D Group, KITECH

(Received 6 April 2015, Received in revised form 15 May 2015, Accepted 22 May 2015)

ABSTRACT

This study is aimed to study combustion characteristics of low NO_x burner using petroleum cokes as fuel. The petroleum coke, which is produced through the oil refining process, is an attractive fuel in terms of its high heating value and relatively low price. But petroleum coke is a challenging fuel because of its low volatile content, high sulfur and nitrogen content, which give rise to undesirable emission characteristics and low ignitability. The petroleum cokes burner is operated at fuel rich condition, and overfire air are supplied to achieve fuel lean condition. The low NO_x burner is designed to control fuel and air mixing to achieve air staged combustion, in addition secondary and tertiary air are supplied through swirler. Air distribution ratio of triple staged air are optimized experimentally. The result showed that NO_x concentration is lowest when overfire air is used, and the burner function at a fuel rich condition.

Key Words : Petroleum cokes, Air staging, Mixing firing, Low NO_x, Refined oil

기 호 설 명

Φ_b : burner equivalence ratio

Q_r : OFA ratio

Φ : system total equivalence ratio

1. 서론

최근 유가의 지속적인 상승과 더불어 기업의 원가절감에 대한 관심이 커짐에 따라 저급 연료의 활용에 대한 관심이 증가하고 있다. 또한 석유코크스의 경우 국내 경질유 생산 증가를 위한 정유 고도화 시설의 증설이 예정되어 있어 국내 생산량도 증가할 것으로 보인다. 석유코크스는 중질유 열분해 공정에서 상압/감압 증류를 열분해하여 경질유분을 만들고 남은 부산물로서 열량이 매우 높지만 가격이

저렴한 장점을 가지고 있다. 그러나 휘발성분의 함량이 매우 낮아 연소 반응성이 매우 떨어지고, 연료 내 질소함량이 높다. 또한 반응 온도조건이 높아 연소 시 질소산화물이 다량으로 생성되는 단점을 가지고 있다[1,2]. 현재 석유코크스 전용 연소기에 대한 연구 개발은 국내외적으로 거의 전무한 상태이다.

K.S. Milenkova 등[3]은 다양한 석유코크스 종류에 따른 휘발분의 휘발특성에 관하여 연구를 하였다.

본 연구에서는 연소반응성이 낮은 석유코크스를 주 연료로 하고, 정제유(이온정제유)와의 혼소를 목적으로 하는 연소기를 설계/제작하여 그 성능을 실험적으로 검증하는 것을 목적으로 석유코크스 연소기의 설계와 운전 최적화를 통해 질소산화물의 발생 최소화를 유도하여 저 질소산화물의 연소기의 성능 검증 및 최적 운전조건 도출을 목적으로 한다.

† Corresponding Author, swkim@kitech.re.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

2. 실험 장치 및 방법

2.1. 연료 특성 분석

2.1.1. 석유코크스

상기한 바와 같이 석유코크스는 중질유 열분해 공정에서 상압/감압 중유를 490℃로 고온 열분해하여 경질유분(LPG, 나프타, 등/경유)을 만들고 남은 부산물로서, 아스팔트 급의 중질유를 코킹 장치에서 처리하여 열분해를 통해 탄소를 주성분으로 하는 미분 형태의 연료이다. 이러한 석유 코크스의 성분에 대하여 분석기관에 직접 의뢰한 분석 결과는 Table 1에 나타내었다. 표에 나타낸바와 같이 석유코크스의 주성분은 고정탄소(Fixed carbon)로서 약 87%로 구성되어지고, 휘발성분(Volatile matter)은 12%이다. 이는 기존의 석탄을 이용한 미분탄 연료와 비교하여 고정탄소량이 매우 높고, 휘발성분의 함량이 매우 낮다. 이러한 구성성분의 특징은 연료의 연소성이 매우 낮게 나타남을 보여준다. 따라서 완전연소에 필요한 체류시간이 상당히 길며, 점화성이 떨어지는 연료이다.

석유코크스의 연료의 연소를 위해서 충분한 체류 시간 확보와 화염안정성 확보가 가장 중요한 요소이다. 따라서 본 연구에 사용한 석유코크스 연소는 정제유의 전소를 통해 연소로의 분위기온도를 약 1200℃까지 승온하고, 석유코크스의 투입량을 증가하면서 정제유의 투입량을 감소하는 형식을 따른다.

2.1.2. 정제유

본 연구에 사용한 오일연료는 정제유로서 이는 다양한 종류의 폐유를 취합하여 물리적 방법과 화학적 방법을 통해 불순물을 정제한 오일연료를 말한다. 정제유는 저급연료로서 중유보다 가격이 낮지만 발열량이 상당히 높은 연료이다. 정제유는 그 정제 방

Table 1. The results of proximate analysis of Petroleum cokes

Analysis contents	Results
Total Moisture(As Received Basis) [%, Wt]	0.51
Proximate Analysis(Air Dry Basis)	
Inherent Moisture [%, Wt]	0.51
Ash [%, Wt]	0.48
Volatile Matter [%, Wt]	11.96
Fixed Carbon [%, Wt]	87.05
Total Sulfur(Air Dry Basis) [%]	5.57
Higher Heating Value	
Gross Calorific Value(Air Dry Basis) [kcal/kg]	8,480
Gross Calorific Value(Dry Basis) [kcal/kg]	8,520

Table 2. The analysis results of refined oil

Analysis contents	Results
Viscosity [mPa.s @ 20℃]	3
Viscosity [mPa.s @ 50℃]	1.7
Viscosity [mPa.s @ 70℃]	1.52
Viscosity [mPa.s @ 40℃ - light oil]	1.9~5.5
Ultimate analysis	
N [mass fraction, %]	0.5
C [mass fraction, %]	88.21
H [mass fraction, %]	8.475
S [mass fraction, %]	0.01
O [mass fraction, %]	2.08
Higher Heating Value	
Gross Calorific Value [kcal/kg]	9501.92

법에 따라 감압정제유와 이온정제유로 나누어진다. 본 연구에 사용한 정제유는 이온정제유로서 분석기관을 통해 직접 분석한 결과는 Table 2에 나타냈다. 점도의 경우 연료공급트레인 설계와 펌프 구성에 중요한 요소이기 때문에 3가지 온도조건에서 분석을 수행하였다. 수행한 결과 정제유의 점도는 경유와 유사하거나 낮게 나타났다. 발열량의 경우 정제유가 약 9500 kcal/kg으로 나타났다.

2.2. 석유코크스 연소기 설계

석유코크스 연소시스템은 연소기와 연소로로 구성되어 있다. 석유코크스의 연소는 석유코크스와 정제유의 혼합연소기를 이용하여 초기에 정제유 전소를 통해 연소로 분위기 온도를 약 1200℃까지의 승온 이후 석유코크스를 이송공기와 함께 투입하는 형식을 가진다.

본 연구에 적용된 연소시스템의 개념도는 Fig. 1에 나타내었다. 개념도에 나타난바와 같이 축방향 모멘텀을 가진 공기의 공급을 통해 화염 선단부에 발생하는 고온영역의 해소를 통해 열적질소산화물(thermal NO_x)의 발생을 억제시키고, 각기 다른 선회강도로 석유코크스와 공기를 공급하여 연소로 내부 유동의 난류강도를 증가시켜 화염의 안정화를 유도하도록 한다. 또한 화염영역의 당량비 조건은 Extreme fuel rich 조건으로 하여 Fuel NO_x의 생성을 억제함과 동시에 후단영역은 OFA(Overfire Air)를 공급함으로써 Extreme Fuel lean 조건을 형성하여 연소영역에서 고온영역의 형성을 억제하여 Thermal NO_x 생성을 억제한다.

본 연구를 통해 설계된 석유코크스-정제유 혼소연소기의 개념도는 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에 나타

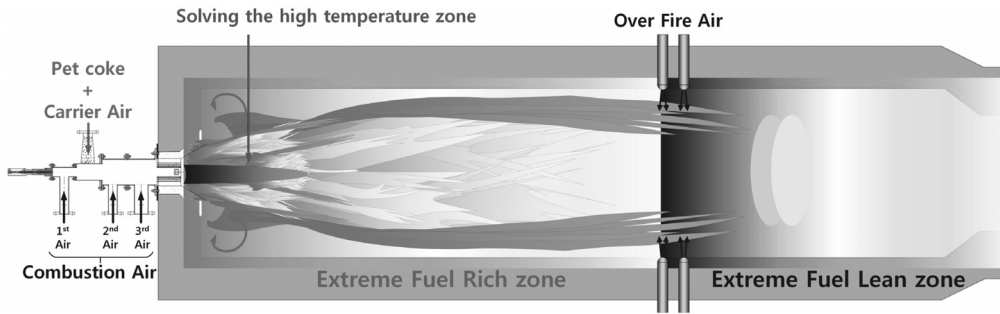


Fig. 1. Schematic diagram of the Petroleum cokes combustion system.

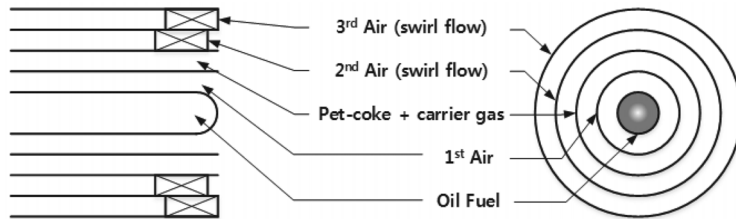


Fig. 2. Schematic diagram of burner.

넌 개념도와 같이 본 연소기는 3단 공기다단 연소기 이고, 석유코크스와 이송가스가 공급된다. 또한 출구 그림에 나타낸바와 같이 연소기는 중앙에 정제유분사를 위한 연료노즐이 위치한다. 본 연료노즐은 일반 상용노즐로서 다공 내부혼합식 노즐을 적용하였다. 이후 연료노즐 주위로 1차공기가 공급된다. 1차 공기는 선회기를 설치하지 않아 축방향 모멘텀이 주가 되어 연소 반응영역으로 공급된다. 이는 Fig. 1의 개념도에 나타낸바와 같이 화염 선단부에 존재하는 고온영역의 해소를 위한 구조로서 설치된다. 1차 공기 주위로 석유코크스와 이송가스가 공급된다. 석유코크스와 이송가스는 사이클론모션으로 공급되도록 설계하였다. 이는 Fig. 3에 나타냈다. 그림에 나타낸 바와 같이 편심 공급을 통해 사이클론모션을 유도하였다. 석유코크스 공급 노즐 주위로 2차, 3차 공기가 공급된다. 2차, 3차 공기는 선회기를 설치하여 선회

유동을 유도하였고, 각각 다른 유속 및 유량으로 공급되도록 한다. 따라서 석유코크스 공급부와 함께 2차, 3차 공기공급부는 각기 다른 선회강도로 화염으로 공급된다. 서로 다른 선회강도의 유동이 인접했을 경우 난류강도는 더욱 증가하여 결국 연소로 내부 유동의 난류강도를 강화하기 위한 설계이다. 2차, 3차 공기의 Swirl number는 아래의 식으로 계산되며, 그 값은 각각 0.924, 0.909이다.

$$S = \frac{2}{3} \left[\frac{1 - (D_h/D_o)^3}{1 - (D_h/D_o)^2} \right] \tan\theta \tag{1}$$

D_h = diameter of hub
 D_o = diameter of swirler

Fig. 4는 실제 연소기의 사진으로서 상기한 내용의 석유코크스 연소기의 실제 모델을 확인할 수 있다.

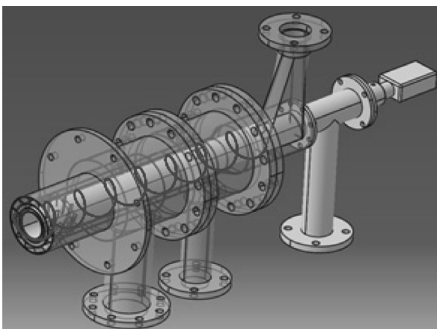


Fig. 3. The cyclone motion of pet-coke and carrier air.



Fig. 4. Picture of the Pet-coke burner.

Table 3. Experimental condition

	Air distribution ratio (1st:2nd:3rd)
case 1	10 : 70 : 20 ($\Phi=0.85$)
case 2	10 : 10 : 80 ($\Phi=0.85$)
case 3	10 : 10 : 80 ($\Phi=0.87$)

2.3. 실험 조건

본 연구를 통해 설계된 석유코크스 연소기의 성능 검증 및 질소산화물 발생 최소화를 위하여 다음과 같은 조건을 정하여 운전 조건의 최적화를 수행하였다.

$$Q_r = \frac{Q_{OFA}}{Q_{total}} \quad (2)$$

where, Q_r : OFA ratio
 Q_{OFA} : OFA flow rate
 Q_{total} : Total air flow rate

상기한 수식은 석유코크스 연소시스템의 OFA(Over Fire Air)의 비율을 최적화하기 위한 조건으로서 3가지 조건의 연소기 당량비(Φ_b)에서 실험을 수행하였다.

또한 다단공기공급 연소특성을 확인하기 위하여 2가지 조건의 Air distribution ratio를 적용하여 실험을 수행하였고, 최적의 성능조건에서 시스템 당량비(Φ)를 변화하여 실험을 수행하였다(Table 3).

상기한 연소기 당량비(Φ_b)는 연소기에 공급되는 연료와 공기량을 통해 계산되는 당량비이며, 시스템 당량비(Φ)는 연소기에 공급되는 공기량과 OFA유량을 통해 계산된 당량비이다.

데이터 수집 속도는 0.2 sample/sec로서 5초에 한 번씩 수집하였으며 가스 분석기는 연소로 배기단에서 TESTO350XL을 이용하여 실시간으로 수집하였다.

3. 실험 결과

3.1. 연소로 승온 및 석유코크스 공급

석유코크스 연소시스템의 운전프로세스는 정제유를 연료로 하여 연소로 내부 온도를 승온하고, 연소로 내부 온도가 약 1200℃까지 승온 후 공급연료를 석유코크스로 전환한다.

상기한 바와 같이 본 연구에 적용된 연소기는 석유코크스와 정제유의 혼소연소기로서 그 설계 비율이 약 9:1(석유코크스 : 정제유)이며 석유코크스 연료의 전환은 석유코크스 투입량증가와 함께 정제유 투입량 감소를 통해 진행된다. 이러한 과정은 Fig. 5에 나타냈으며, 상기한 단계를 통해 최종적으로 연료비율을 목표비율로 조정하였다.

Fig. 6과 7은 초기 연소기 운전 과정 중 O₂와 NO_x를 나타낸 그래프이다. 그래프에 나타낸 바와 같이 연소기의 당량비와 OFA의 투입을 통해 배기가스 O₂를 조절하였으며, 그에 따라 NO_x가 저감되는 결과를 확인할 수 있다. 이는 연소기당량비의 조절을 통해 화염 초기에 Fuel rich 조건의 운전을 통해 Fuel NO_x의 생성을 억제하고 화염영역과 OFA공급을 통한 후단영역에 Extreme fuel rich/lean 조건의 운전을 통

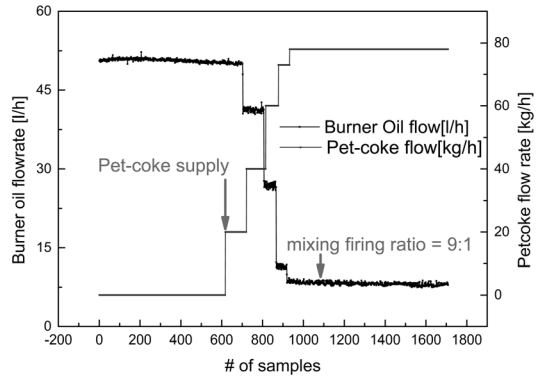


Fig. 5. The flow rate of pet-coke & refined oil.

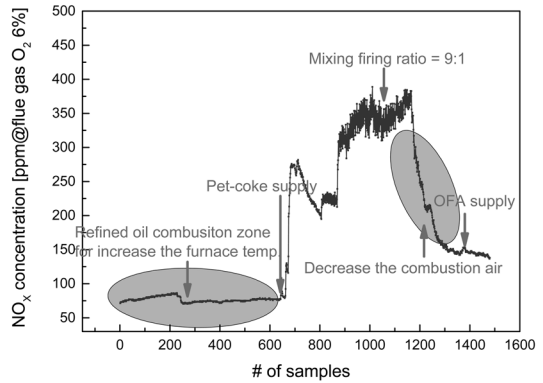


Fig. 6. The NO_x concentration during experiment.

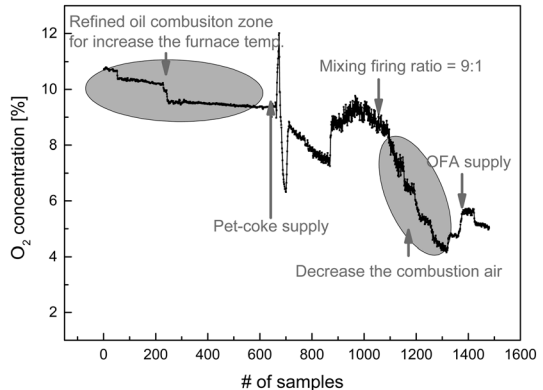


Fig. 7. The O₂ concentration during experiment.

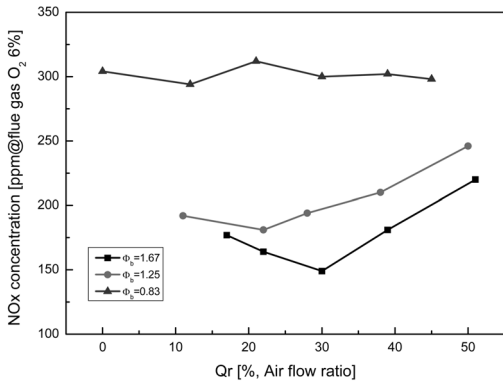


Fig. 8. NO_x concentration for Q_r.

해 반응영역의 고온영역생성을 억제함으로써 Thermal NO_x의 발생을 억제하여 나타난 현상이다.

Fig. 8은 OFA의 최적화를 위해 수행한 실험이다. 그림에 나타난 바와 같이 3가지 조건의 연소기 당량비(Φ_b)에서 Q_r을 변화한 결과를 살펴보면 NO_x저감을 위한 최적의 Q_r이 존재하며, 연소기당량비 $\Phi_b=0.6$ 의 조건에서 Q_r=30%일 때 NO_x 저감이 가장 크게 나타났으며, 저감 비율이 약 50%이다.

이는 상기한 바와 같이 연소기 당량비(Φ_b)를 fuel rich 조건으로 운전하며 부족한 공기를 OFA를 통해 공급하여 연소로 배출구에서 NO_x는 148 ppm으로 나타났으며 CO는 120 ppm으로 나타났다. 이와 같이 화염 초기 부분에 fuel rich조건인 화염을 형성함으로써 Fuel NO_x의 생성을 억제하고, 화염 반응영역에 핫스팟의 생성을 억제함으로써 Thermal NO_x의 발생을 억제한다. 또한 이와 같이 fuel rich, 조건인 화염은 불완전 연소로 인한 미연분과 높은 농도의 CO를 배출한다. 이를 방지하기 위해 연소영역 후류에 OFA를 공급함으로써 fuel lean조건인 반응장의 형성을 유도하여 미연분과 높은 농도의 CO를 해소한다. 이러한 설계개념은 상기한 결과에 나타났으며, 연소기의 운전조건이 fuel rich조건, 후류의 OFA가 전체 공기 공급의 30%로 공급될 때 최적의 성능을 보인다.

3.2. 저 NO_x 최적화 운전

상기한 최적의 OFA조건에서 다단공기 공급을 통한 연소기의 최적 운전 조건의 확립을 위해 다단 공기 공급의 조건 변화를 통한 결과를 Fig. 9부터 11에 나타냈다.

다만 1차공기의 경우 화염초기의 반응영역의 고온영역의 해소를 위해 공급하나, 그 양이 10%로서 매우 적다. 이는 fuel rich조건인 화염영역에서 1차공기의 과다투입은 오히려 고온영역을 형성하는 문제점을 가지고 있다. 따라서 예비실험을 통해 1차 공

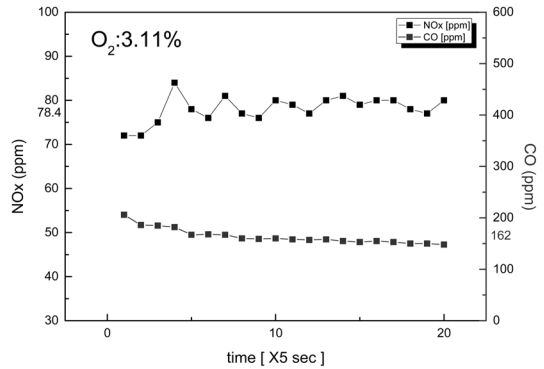


Fig. 9. NO_x & CO concentration at case 1.

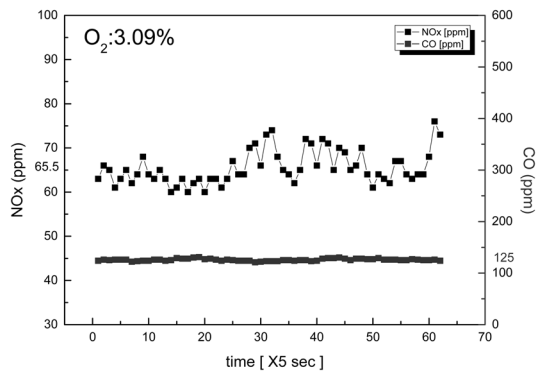


Fig. 10. NO_x & CO concentration at case 2.

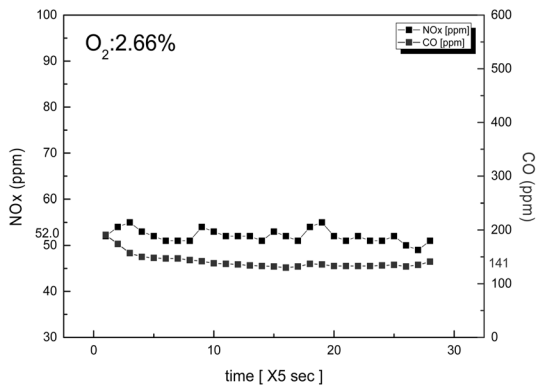


Fig. 11. NO_x & CO concentration at case 3.

기는 10%의 최적 공급조건으로 고정하였다.

다음은 다단공기 공급을 통한 연소기의 최적 연소 조건을 위해 2가지 조건의 Air distribution ratio에서 실험을 수행한 결과이다.

그래프는 본 연구에 적용된 연소시스템의 운전 조건별 성능을 NO_x, CO의 배출농도를 통해 나타냈다.

Fig. 9는 2차 공기를 주로 공급하는 case1의 실험 결과를 나타낸다. 배기가스 NO_x의 농도는 평균 78.4 ppm으로 나타났고, CO는 162 ppm으로 나타났다.

Fig. 10은 3차 공기를 주로 공급하는 case2의 실험 결과를 나타낸다. 그림에서 보는바와 같이 3차 공기를 주로 공급하는 경우 NO_x, CO의 배출 성능은 향상되었다.

상기 조건을 통해 3차 공기를 주로 공급하는 조건을 유지하며 최적화한 실험 결과를 Fig. 11에 나타냈다. 그림에서 보는바와 같이 NO_x는 52 ppm, CO는 141 ppm으로 나타났다. 또한 최적화의 경우 배기가스 O₂농도는 2.66%로 나타났다.

2차 공기 공급부와 3차 공기 공급부에는 상기와 같이 선회기를 설치하여 선회유동을 형성하도록 설계하였으며, 화염의 난류를 증가하기 위해 2차 공기 공급부의 선회강도와 3차 공기 공급부의 선회강도를 달리 설계하였다. 또한 2차 공기 공급부의 선회강도보다 3차 공기 공급부의 선회강도가 강하게 나타나도록 설계하였다.

이러한 설계개념과 실험 결과를 살펴보면 선회강도가 강하게 나타나는 유동조건이 석유코크스의 저 NO_x운전에 유리하게 나타나며, 이는 석유코크스의 연소시간 확보를 위한 유동의 형성과 난류강도의 증가를 통한 화염안정화의 설계 목적이 유효하게 작용하였음을 나타낸다.

4. 결론

연소성이 낮은 석유코크스를 주 연료로 하고, 정제유(이온정제유)와의 혼소를 목적으로 하는 연소기를 설계/제작하여 그 성능을 실험적으로 검증하기 위한 실험적인 연구를 수행한 결과는 다음과 같다.

1) 설계된 연소기는 연소성이 낮은 석유코크스를 주 연료로 하여 혼소비율 9:1의 조건에서 안정적인 화염을 형성하였다.

2) 높은 선회강도를 통해 화염에서 발생하는 국부적인 고온영역의 해소를 위해 연소기 당량비(Φ_b)를 Fuel rich 조건으로 운전하고, OFA를 통해 Qr을 약 30%로 운전하는 최적 운전 조건 확립하였다.

3) 다단공기공급 조건(Air distribution ratio)을 조절하여 최적의 운전조건에서의 버너 운전 성능은 NO_x 52 ppm, CO 141 ppm으로 나타났다.

4) 향후 본 연구를 통해 확보한 설계파라미터 및 운전조건 파라미터를 통해 연소기의 scale-up 및 추가적인 NO_x저감을 위한 연소기 구조개선에 대한 연구를 수행할 예정이다.

후기

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No.20132010101900).

참고문헌

- [1] E. J. Anthony, "Fluidized bed combustion of alternative solid fuels; status, successes and problems of the technology", *Progress Energy Combust Sci*, vol. 21, (1995) pp. 239-268.
- [2] R. W. Bryers, "Utilization of petroleum coke and petroleum coke/coal blends as a means of steam raising", *Fuel Process Technology* vol. 44, (1995) pp. 121-141.
- [3] K.S. Milenkova, A.G. Borrego, D. Alvares, J. Xiberta, T. Menendez, Devolatilisation behaviour of petroleum coke under pulverized fuel combustion conditions, *Fuel*, 82 (2003) pp. 1883-1891.
- [4] 권민준, 이창엽, 김세원, "석유코크스 연료 전용 연소기에 대한 실험적 연구", 제 48회 한국연소학회 춘계학술대회, pp.27-28, (2014).
- [5] 한국생산기술연구원, "석유코크스 연료 전용 고효율 저공해 산업용 보일러 시스템 상용화 개발", 에너지자원융합원천기술개발사업 보고서 (2014).