

HCNG용 버너시스템에서 Tail Gas 첨가 시 연소특성

한정옥^{**} · 이중성^{*} · 김형태^{*} · 김상민^{*} · 이영철^{*} · 김용철^{*} · 홍성호^{**}

^{*}한국가스공사 연구개발원 · ^{**}신라대학교

Combustion Characteristics of HCNG Burner System with Tail Gas Addition

J. O Han^{**}, J. S Lee^{*}, H. T Kim^{*}, S. M Kim^{*}, Y. C Lee^{*}, Y. C Kim^{*} and S. H Hong^{**}

^{*}KOGAS R&D Division, ^{**}Silla University

(Received 31 March 2015, Received in revised form 22 June 2015, Accepted 23 June 2015)

ABSTRACT

The combustion characteristics of metal fiber burner fueled natural gas with tail gas produced from reforming process were analyzed on the point of flame stability and excess air conditions. Also, it was analyzed the effect of energy efficiency improvement due to decrease the fuel input in reforming system by using residue gases. As a results, it was confirmed that tail gas including hydrogen, CO and CO₂ could be directly injected without any change of air control system in natural gas burner and also energy efficiency was increased up to 30% maintained stable combustion.

Key Words : HCNG (hydrogen blended compressed natural gas), Reforming system, Tail gas, Combustion, Metal fiber burner, Excess air, Energy efficiency

1. 서론

천연가스는 주성분이 메탄(CH₄)으로서 탄소 대비 수소 비가 4로 완전연소 시 이산화탄소 배출이 상대적으로 적은 친환경 연료이고 유가 변동에 따른 유동성이 경우에 비해 우수하나 강화된 배출가스 규제를 만족하기 위해서는 고가의 정화장치가 추가될 수밖에 없으며 결국 이러한 기술은 또 다시 해외에 의존할 수밖에 없는 실정이다. 대체연료로 부상되고 있는 수소는 지구상에서 가장 쉽게 찾아볼 수 있는 원소로서 연소 시 이산화탄소를 배출하지 않아 온실가스의 문제가 전혀 없으며 궁극적인 미래의 연료라 할 것이다. 하지만 수소를 단독으로 사용할 경우 연료를 공급해야하는 인프라가 아직 충분치 않아 약 20~30% 정도의 수소를 천연가스와 혼합하여 연료로 사용한다면 수소의 장점과 천연가스의 장점을

을 겸비한 우수한 연료로 사용이 가능한데 이것이 수소혼합천연가스(이하 HCNG) 연료이다.

HCNG 연료를 엔진에 적용할 경우 후처리 장치 없이 EURO6 이후의 NO_x 규제를 만족시킬 수 있는 것으로 알려져 있다. 최근에는 점차 강화되는 배기 규제를 만족시키고자 post EURO6 CNG 엔진에서 이론공연비 연소방식이 채택되는 추세이지만 HCNG 연료를 적용하면 Cooled EGR(배기 재순환)을 충분히 공급할 수 있어 연비향상과 내열내구성을 만족할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

본 논문에서는 HCNG용 연료 공급시스템에서 효율을 향상시키기 위해 고순도 수소를 생산하고 남은 잔류가스(Tail Gas)를 버너 연료로 활용할 경우 버너 안정성과 효율 상승효과를 분석하였다.

2. HCNG용 개질시스템

2.1. 개질시스템 개요

천연가스를 연료로 하는 30 Nm³/h급 수증기 개질 시스템을 Fig. 1과 같이 구성하였다. 초기 기동 시에는 버너에 투입되는 연료는 모두 천연가스가 소비되며 반응기(reformer) 온도를 올려주는 가열원이 된

† Corresponding Author, johan@kogas.or.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.

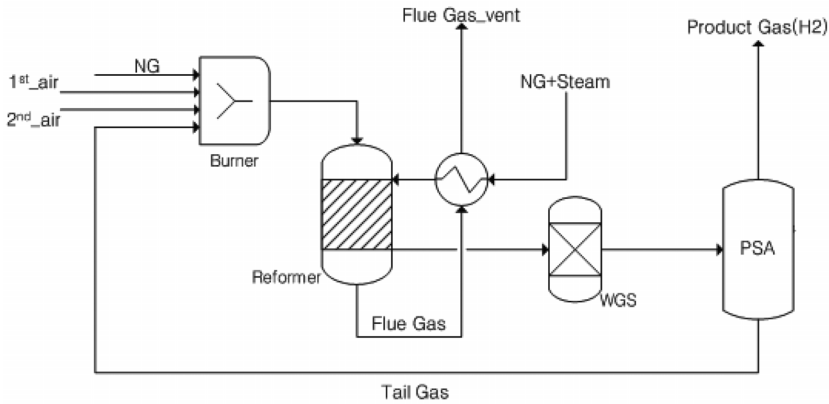


Fig. 1. Schematic diagram of burner system in a reforming system.

	명칭	Metal Fiber Burner
	버너크기 (외경x높이x매트길이)	60.5 x 670 x 265 (mm)
	매트 소재	Fecralloy (메탈화이버)
	연소방식	표면 연소방식
	공급 열량	50,000 kcal/h 급
	점화방식	스파크 방전
	화염감지 방식	플래임 로드 방식
온도 측정	내/외부 열전대	

Fig. 2. Appearance and specifications of the metal fiber burner.

다. 개질반응은 흡열반응이기 때문에 지속적인 열량이 공급되어야 하며 버너 연료의 공급량이 개질시스템의 효율에 영향을 주게 된다. 개질 반응은 수증기와 천연가스를 촉매층이 있는 튜브 내부로 공급해 주면 촉매층을 통과하면서 개질반응이 일어난다 [1]. 열량 공급을 위한 메탈화이버 버너의 외관과 사양을 Fig. 2에 나타내었다.

개질 반응이 시작되면 H₂뿐 아니라 부산물로 CO, CO₂ 및 미 반응 가스들이 생성물에 포함되게 되며 수소 정제장치를 거치면서 고 순도의 생산된 수소 이외에 잔류 수소, 일산화탄소 및 미 반응 가스와 같은 가연성분들이 남아있게 된다. 이러한 잔류가스를 테일가스(tail gas)라 부르며 이를 버너 연료에 재활용할 경우 시스템 효율을 향상시킬 수 있다[2].

2.1.1. 개질시스템 버너개동

사용한 버너는 메탈화이버 버너를 사용하였으며 1차 공기와 2차 공기를 각각 공급하여 안정적인 화염이 유지되도록 하였다. 특히, 2차 공기는 연소 안정성에도 기여할 뿐만 아니라 연소실 내부 과열을 억제하는 기능을 하며 적절한 양을 공급함으로써 효율 영향을 최소화 하였다.

버너 연료와 공기는 유량제어 밸브를 통해 제어

하여 개질장치 내부 온도를 900℃ 내외로 가열시키며 버너시스템 및 개질튜브가 국부 과열되지 않도록 버너 열량을 조절하게 된다. 버너에 사용되는 연료는 제한이 없으며 가연가스를 추가 공급할 경우 연소 호환성 측면의 고려해야 한다.

즉, 초기 사용연료인 천연가스와 운전 중 부산물인 테일가스가 공급될 때 필요 공기량, 출력, 연소속도 등에 대한 차이를 검토하여 연료 교체에 따른 운전조건의 변화 필요성을 검토하여야 한다.

2.1.2. 테일가스의 연소성 비교

천연가스 조성은 메탄을 주성분으로 하는 혼합가스이며 이를 개질기의 원료가스와 공정 가열용 버너 연료로 이용하였다. 테일가스의 조성을 공정분석을 통해 Table 1과 같이 예측하였다. 테일가스 총발열량은 2,022 kcal/Nm³으로 천연가스의 20% 수준이지만 아직도 열량을 함유하고 있는 가연성 가스이다.

예측된 조성으로부터 출력과 연소속도를 비교할 수 있는 웨버지수와 연소속도 지수를 산출하였고 동일 출력을 발생하기 위해 필요한 버너 연료 유량과 이때의 필요 공기량을 분석하였다.

Table 2에서 보는 바와 같이 천연가스만으로 버너에 공급할 경우 이론 공기량이 42 Nm³/h인 반면, 천

Table 1. Prospect of tail gas composition after hydrogen extraction among reformed gases

천연가스	조성비(%)	테일가스	조성비(%)
CH ₄	91.31	H ₂	52.3
C ₂ H ₆	5.47	CO	9.4
C ₃ H ₈	2.06	CO ₂	36.6
C ₄ H ₁₀	0.96	CH ₄	1.5
N ₂	0.2	N ₂	0.2
계	100	계	100

Table 2. Comparison of properties between natural gas and tail gas

구 분	천연가스	테일가스	혼합가스 (NG+TG)	
총발열량 (kcal/Nm ³)	10,399	2,022	3,060	
비중	0.62	0.69	0.68	
웨버지수	13,243	2,428	3,699	
연소속도(cm/s)	36.8	64.9	45.5	
버너 열량 41,600 kcal/h 공급시 유량	버너 유량 Nm ³ /h	4.0	20.6	13.7 (NG: 1.7, T.G: 12.0)
	이론 공기량 Nm ³ /h	42	33	37
	이론 공기비	10.39	1.61	2.7

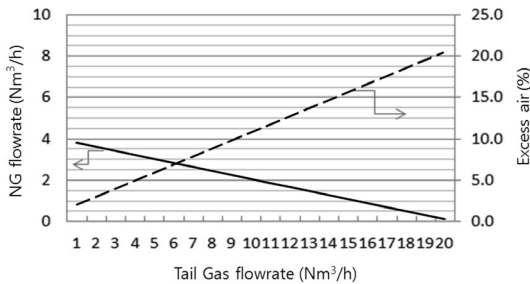


Fig. 3. Required burner NG flow rate according to tail gas addition to sustain the constant heating energy and deduced excess air (%).

연가스에 테일가스를 공급한 혼합가스 상태로 연소시키는 경우 필요한 이론 공기량은 37 Nm³/h로, 그 차이는 약 12% 수준으로 천연가스만으로 단독 공급하여 연소 할 때보다 다소 과잉 상태로 운전됨을 알 수 있다[3].

테일 가스의 양이 가변되는 경우를 고려하여 Fig. 3에 버너 입열량이 일정(41,600 kcal/h)할 경우를 기준으로 테일가스량 변화에 따른 NG 유량을 표시하였고 이때 과잉공기량은 테일가스량과 비례함을 알 수 있다. 즉, 테일가스량이 12 Nm³/h 공급될 경우 추가 NG 유량은 1.7 Nm³/h이며 이때 공급되는 공기량이 일정할 경우 12%의 과잉공기 상태가 유지됨을 알 수 있다.

이때 테일가스 열량이 Table 2에 예상한 것처럼 2,022 kcal/Nm³ 수준일 경우 에너지 효율은 57%가 개선되는 것을 알 수 있다. 테일가스 열량은 수소 생산을 극대화 할수록 낮아지기 때문에 높은 열량은 바람직하지 않으며 실험 최적화를 통해 열량범위를

낮출 필요가 있다. 안정적인 연소가 이루어지기 위해 배기가스 중 산소농도를 5% 내외로 제어할 경우 공기 과잉률이 30% 수준임을 고려할 때 테일가스 치환 시 공기량을 테일가스량에 비례하여 줄여주는 것이 연소 안정성 및 효율향상에 도움이 될 것으로 판단된다.

2.2. 개질시스템 운전절차

개질장치를 운전하기위해 우선 버너연료로 천연가스를 공급하여 노내 온도를 상승시켜야 한다. 운전 초기에 온도 상승 속도에 따라 6~7 Nm³/h까지 증가시키고 노내 온도가 설정온도인 900℃ 부근으로 가열되면 버너 공급 천연가스량을 4~5 Nm³/h로 감소시키고 개질튜브에 개질용 천연가스를 공급하여 반응을 시작하게 된다. 이때 개질된 합성가스가 정제장치를 거치면서 수소를 생산하게 되며 잔류가스에 해당하는 테일가스를 버너로 공급하고 버너 연료로 공급되는 천연가스량을 줄여주게 된다.

3. 실험결과

3.1. 개질장치 노내 온도변화

Fig. 4는 개질장치 운전 시 노내 온도변화로 개질기 내부 온도 및 개질튜브 상부온도를 나타낸 것으로 기동 후 3시간 이후 안정적인 노내 온도가 유지됨을 알 수 있고 튜브 상부온도는 900℃까지 상승함을 알 수 있다. 테일가스 공급 시점에 노내 온도가 감소하는 이유는 버너의 연료로 공급되는 천연가스와 테일가스의 유량 조절밸브는 수동 조작하여 작동하는 상태로 테일가스 공급시점에 일어난 공급연료 유량 변동에 따른 일시적으로 온도가 감소한 단순 변동현상이다. 그림에서 보는바와 같이 테일가스 투입전후 안정적으로 노내 온도가 900℃ 내외로 유지되는 것으로 확인되었다.

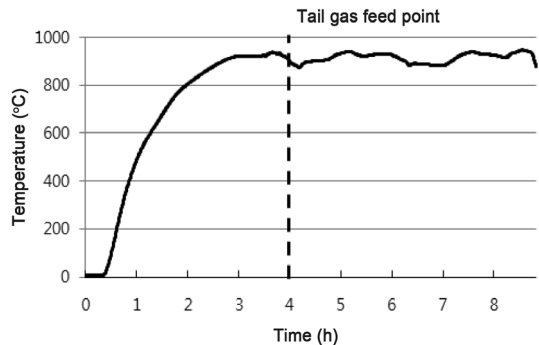


Fig. 4. Temperature history in combustion chamber during reforming process including tail gas return.

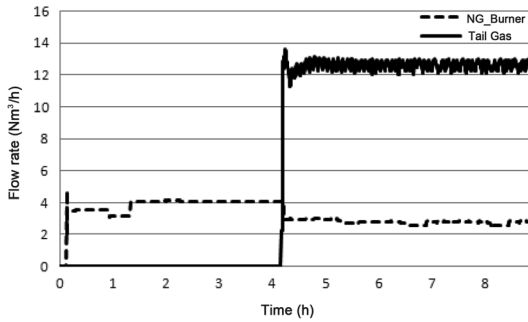


Fig. 5. Burner fuel history during reforming process including tail gas return.

3.2. 버너 연료 공급량 변화

Fig. 5는 연소실 온도 900℃와 배기가스중의 산소 농도 5%로 유지하기 위한 천연가스와 테일가스의 유량을 나타낸 것이다. 즉, 초기 노에 공급되는 천연가스 유량을 4 Nm³/h로 유지하다가, 테일가스 12 Nm³/h를 공급하였을 때 배기가스 중의 산소 농도와 연소실 온도를 유지하기 위해 공급되는 천연가스 공급량은 2.8 Nm³/h로 나타났다. 이는 Table 2에서 분석된 열량보다 다소 낮아짐으로 인해 당초 예상된 천연가스 1.2 Nm³/h보다 약 1.6 Nm³/h 정도 초과 공급된 것을 확인할 수 있었다. 이에 대한 정확한 원인은 테일가스 조성분석을 통해 추가 확인할 예정이다.

테일가스 공급 전후 개질기 온도 변화는 안정적으로 유지되고 있음을 알 수 있으며 테일가스를 활용함으로써 기존 4 Nm³/h에서 2.8 Nm³/h로 감소하여 효율은 30% 향상되는 것으로 확인되었다.

3.3. 버너 화염사진

사용한 버너는 실린더형 메탈화이버 버너로 1차 공기와 2차 공기를 공급하여 표면연소가 이루어지는 형태이다. 공연비 조건에 따라 버너 표면색이 변하며 이론공연비 조건일 경우 푸른색을 띠며 약간 농후한 경우 붉은색을 띠게 된다. 반대로 공연비가 약간 희박한 경우 밝은 색을 띠며 가장 온도가 높게 형성되는 조건이다. 테일가스 공급 전후의 버너 표면 사진을 Fig. 6에 표시하였다.

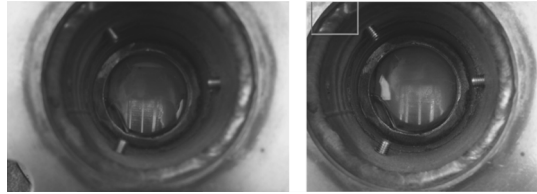


Fig. 6. Photos of flame comparison between before tail gas injection(left) and after injection(right).

버너는 붉은 색으로 1차공기가 다소 농후한 조건으로 운전되고 있음을 알 수 있고 테일가스 투입 전 후에 큰 변화를 보이지 않는 것으로 나타났다. 이로 부터 공기량 변화를 주지 않고 테일가스를 투입할 경우 버너는 안정적으로 운전됨을 확인하였다.

4. 결론

메탈화이버 버너에서 수소가 혼합된 테일가스를 투입할 경우 개질장치 내에서 부상화염과 같이 불안정한 연소가 관찰되지 않고 안정적으로 연소가 이루어짐을 확인하였다. 또한 공급열량을 일정하게 유지시킬 경우 안정적으로 노내온도를 유지시킬 수 있고 테일가스를 활용하면 버너 연료를 30% 정도 절감시킬 수 있는 것으로 확인하였다.

후기

본 연구결과는 환경부 친환경자동차기술개발사업단의 일부 연구비지원으로 이루어 졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] KOGAS. Development of HCNG engine and Refueling Station for City Bus Application. Yearly 3rd Report. April 2014
- [2] J.O Han, J.S Lee, Y.C Lee, Y.C Kim, H.S Kim, S.M Kim. Combustion Stability of HCNG Reforming System by Tail Gas Addition in Burner Fuel. Nov. 27h~29th, 2014. 145-146.
- [3] Y.C Ha. Program for Natural Gas Properties Calculation. 2012.