

콘덴싱 가스보일러용 원통형 다공버너의 최적화 연구

이창언* · 장기현** · 이강주*** · 정영식***

*인하대학교 기계공학부, **인하대학교대학원, ***인하공업전문대학 기계과

The Optimization of Cylindrical Perforated Burner for Condensing Gas Boiler

Chang-Eon Lee*, Gi-Hyun Jang**, Young-Sik Jeong*** and Kang-Ju Lee***

*Department of Mechanical Engineering, Inha University

**Graduate school, Inha University

***Department of Mechanical Engineering, Inha Technical College

요 약

본 연구에서는 콘덴싱 가스보일러의 NO_x와 CO 배출농도를 줄이기 위한 방안으로 원통형 버너와 열교환기를 평면으로 모사한 평면 버너와 열교환기를 제작하여 버너와 열교환기 거리에 따른 배기 특성을 검토하였다. 그리고 평면 버너 실험에서 도출한 거리에 따라 직경이 다른 3종류의 원통형버너를 제작하여 각각의 화염 안정성과 배기 특성, 효율 등을 검토하였다. 위와 같은 연구결과에 의해 최적화된 버너를 응축 가스 보일러에 장착하여 LNG와 LPG를 연료로 사용하여 보일러에 대한 종합성능, 즉 화염 안정성, 난방효율 및 배기 특성 등을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 난방부하 20,000 kcal/hr에 적합한 다공 예혼합 원통형 버너의 최적 제원을 결정하였으며, 이 버너는 당량비 0.68~0.85 부근에서 turn-down ratio 가 약 5 : 1 정도로 비례제어에 적합하였다. 그리고 보일러의 종합성능을 검토한 결과 난방부하 20,000 kcal/hr로 운전할 경우 LNG, LPG 모두 난방효율 97%(저위 발열량 기준)를 달성할 수 있었고 NO_x와 CO 배출농도(O₂=0%, wet basis)는 LNG의 경우 각각 26 ppm과 85 ppm, LPG의 경우 각각 41 ppm과 113 ppm 정도로 매우 양호하였다.

Abstract— The objective of performing this study is to develop low emission condensing gas boiler. To reduce NO_x and CO, three reasonable distances between burner and heat exchanger were decided through the experiments of model plane burner. Three burners with different diameter were made and then emission characteristics were examined. The optimum burner geometry was determined from flame stability, pollutant emission characteristics and applicability to the practical boiler system. In the domain of equivalence ratio 0.68~0.85, turn-down ratio of the burner designed by this research was extended to a wider range of 5 : 1. Thermal efficiency of the boiler developed by this study reached to 97% (LHV basis) of heating water efficiency at heating load of 20,000 kcal/hr when fueled by both of LNG or LPG. Emission (O₂=0%, wet basis) of NO_x and CO concentration was 26 ppm and 85 ppm when fueled by LNG, 41 ppm and 113 ppm when fueled by LPG respectively.

1. 서 론

도시가스는 석유와 유연탄을 대체하는 에너지로서 국민소득 증대에 따른 생활수준 향상, 정부의 에너지 다원화 정책의 일환으로 추진되고 있는 천연가스 보급 확대 사업과 가스 특성인 청정성, 편리성, 안정성 등으로

인해 그 수요의 지속적인 증가가 전망되고 있다. 이에 따라 천연가스를 연료로 사용하는 가스보일러 시장은 꾸준히 증가하고 있는 추세이다. 현재 국내에서 많이 사용되는 분체 버너식 가스보일러는 구조적으로 열효율이 낮고 제작공정이 복잡하다는 단점을 갖고 있다 또한, 완전 예혼합 화염에 비하여 화염길이가 길고 고온 연소 생

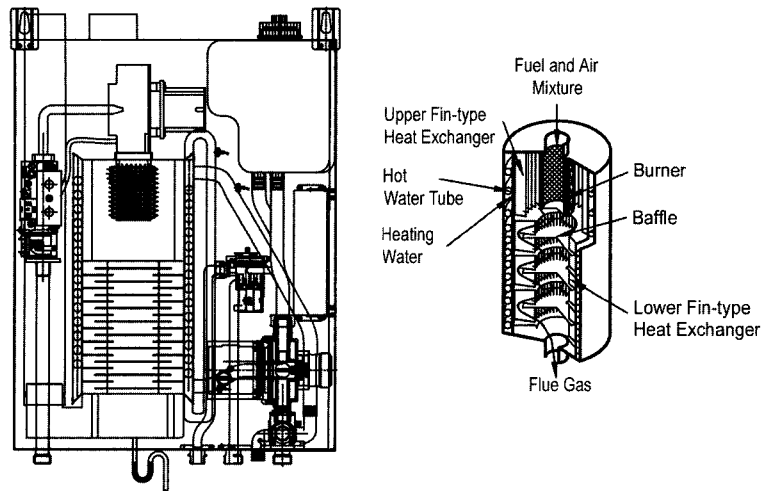


Fig. 1. Schematic of developed condensing boiler.

성물들의 화염내 체류시간이 길어져 NOx 배출농도가 비교적 높다^{[11][13]}, 따라서, 엄격해지는 환경 규제 및 효율 등급화를 통한 에너지 절약 정책에 대응하기 위해서는 위 분젠버너식 보일러가 갖고 있는 문제점들을 동시에 극복할 수 있는 새로운 보일러의 개발이 시급한 실정이다^[4].

Fig. 1은 본 연구를 통하여 개발중인 콘덴싱 보일러이다. 버너 및 열교환기는 모두 원통형이며, 버너는 열교환기의 상부 중심에 내장되어 있다. 열교환기는 크게 Fig. 1의 상부와 하부에 도시한 알루미늄으로 압출 성형한 핀형 열교환기와 그 외부에 난방수 및 온수 유로를 형성하면서 핀형 열교환기를 통하여 전달된 열을 난방수 혹은 온수에 전달하는 코일형 열교환기로 구성되어 있다. 세부적으로는, 핀형 열교환기는 버너 바로 측면에 위치하며 핀의 높이가 낮은 상부 열교환기와 그 하부에 핀 높이가 높은 하부 열교환기로 구성되어 있다. 그리고 이 하부 열교환기에는 연소가스의 난류강도 및 핀과의 접촉을 증가시켜 응축 열교환이 용이하게 일어나도록 배플(baffle)이 설치되어 있다. 이와 같은 구조에서는 원리적으로 하부 핀형 열교환기를 충분히 길게 하면 응축이 일어날 때까지 열교환이 가능하며, 이 과정에서 발생한 액적은 분젠 버너식 보일러와는 달리 연소과정에는 아무런 영향을 미치지 않는다.

본 연구의 선행연구에서는 버너와 각종 열교환기 부품 즉, 상부 핀형 열교환기, 하부 핀형 열교환기, 배플 및 코일형 열교환기에 대해 단순화된 모형 열교환기를 이용하여 각 부분의 상세한 설계 제원을 결정하였다. 그리고, 설계된 원통형 열교환기와 원통형 버너를 이용하여 시제품 콘덴싱 보일러를 제작하여 보일러의 난방 및

온수 효율, 배기가스 특성을 검토하였다^{[5][6]}. 본 연구에서는 이와 같은 연구개발을 바탕으로 개발된 시제품 보일러를 상품화하기 위하여 보일러의 중요부분인 원통형 다공버너의 화염안정성 및 배기특성을 최적화하여 제품의 내구성을 향상시키고 CO 및 NOx 배출농도를 줄이는데 그 목적이 있다.

2. 다공버너의 제원 결정 및 토의

2-1. 평면버너를 이용한 원통형 버너의 직경 결정

선행연구^{[5][6]}에서 개발한 직경 60 mm의 버너를 장착하여 분젠버너에 비해 낮은 약 150 ppm의 CO의 배출농도를 얻은 바 있으나 CO 배출농도를 보다 줄이기 위한 방안으로 버너와 열교환기 사이의 거리변화에 따른 오염물질 배출특성을 검토하고자 원통형 버너와 열교환기를 평면으로 모사한 평면 버너와 열교환기를 제작하였다.

Fig. 2는 버너의 직경을 결정하기 위한 실험장치를 도시한 것으로, 크게 버너와 열교환기로 구분된다. 실험에 사용된 평면 버너에서 화염이 형성되는 면적은 직경 60 mm의 원통형 버너의 표면적의 약 1/2에 해당하며, 평

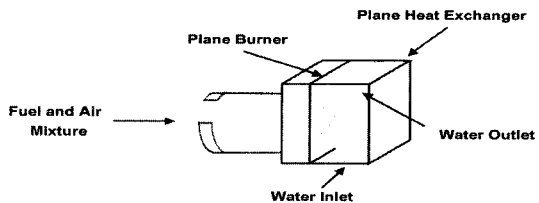


Fig. 2. Experimental apparatus of plane burner and heat exchanger.

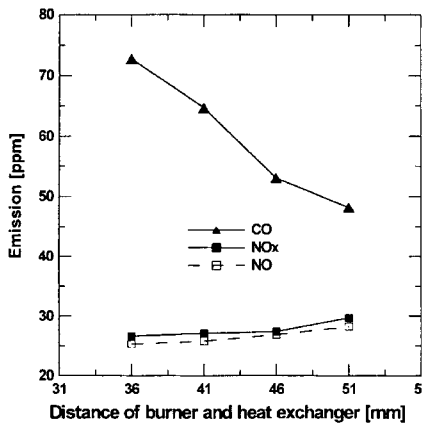


Fig. 3. Emission characteristics with distance between burner and heat exchanger.

면 열교환기의 투영면적은 버너와 동일하게 하였다. 평면 열교환기 후면에는 냉각수의 흐름방향이 coil형 열교환기에서의 냉각수 흐름과 유사하도록 유로가 설치되어 있다. 열교환기와 버너사이의 거리는 연소특성 및 배기가스특성의 중요한 인자이기 때문에, 본 연구에서는 평면 버너와 열교환기 사이의 거리를 36 mm부터 51 mm까지 5 mm씩 변화시켜가면서 연소특성을 검토하였다.

Fig. 3은 당량비 0.8일 때 버너 표면과 열교환기 사이의 거리변화에 따른 NOx와 CO의 배출특성을 나타낸 것이다. 결과로부터 알 수 있듯이 버너 표면과 열교환기 사이의 거리가 가까울수록 NOx 생성량은 다소 감소하며, 이것은 NOx 배출기구의 주요 요인중에서 열적(thermal) NOx의 발생지역인 화염 후류의 가스 온도가 낮아지기 때문이다. 반면 CO의 배출농도는 거리가 가까울수록 화염이 비교적 저온의 열교환기 표면에 가까워지면서 냉각효과(quenching effect)에 의한 영향으로 일단 생성된 CO가 CO로 2차 반응하지 못하고 그대로 반응이 동결된 채로 방출되기 때문에 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이 실험결과를 바탕으로 현재 41 mm인 원통형 버너와 열교환기의 거리를 포함하여 각각 43.5 mm 및 46 mm로 변화시켰을 때 해당되는 버너의 직경은 각각 50 mm, 55 mm, 60 mm가 되며 본 연구에서는 3종의 버너에 대해서 보다 구체적인 연구를 수행하였다.

2-2. 원통형 버너의 화염안정성

앞에서의 실험을 바탕으로 결정된 서로 다른 직경을 갖는 3종류의 버너($D_b=50, 55$ 및 60 mm)를 제작하여 각각의 버너에 대해 화염안정성, 당량비와 부하량 변화에 따른 배기특성 및 성능실험을 수행하였다.

Fig. 4는 설계된 원통형 버너를 실험하기 위한 장치

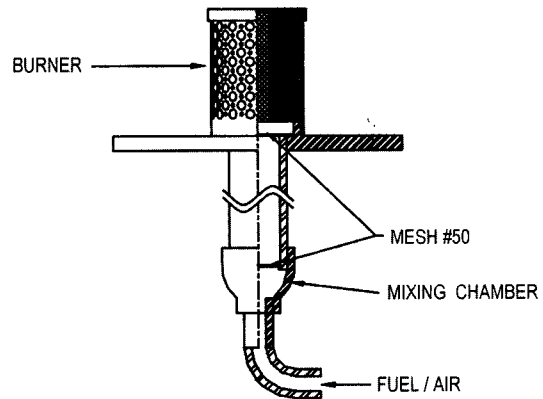


Fig. 4. Experimental apparatus of can-type burner.

이다. 연료와 공기는 내경 19 mm와 25 mm의 호스를 통하여 공급되며, 원활한 혼합과 역화를 방지하기 위하여 혼합라인 중간에 메쉬(mesh, # 50)를 설치하였다. 원통형 버너로 유입된 혼합기의 균등한 유량분배와 역화방지를 위하여 버너내에도 마찬가지로 메쉬를 설치하였다. 메쉬는 최고부하시에도 균일한 혼합 및 유량분배가 가능하도록 여유 있게 10장을 겹쳐서 설치하였다. 그리고, 메쉬와 버너간의 간격을 적절하게 유지하기 위해서 메쉬와 버너 사이에 적정두께의 환형 링을 설치하였으며 메쉬의 고정을 위하여 안쪽에 또 다른 링을 사용하였다.

이와 같은 실험장치에서 버너의 안정 연소 범위는 화염 연구에서의 유속분포에 크게 의존하게 된다. 만약 버너의 하부와 상부에서의 혼합기 유속에 차이가 커지면 한쪽 부분에서 먼저 역화나 날림(blow-off)이 발생해 연소의 안정 연소 범위가 좁아지게 된다^{[7][8][9]}. 개발된 예혼합 원통형 버너의 경우에는 내부에 메쉬가 설치되지 않았을 때 상부(버너 끝단)로 갈수록 유속이 증가하여 안정 연소 범위가 매우 좁아지지만 메쉬를 설치하게 되면 유속분포가 비교적 균일해짐을 알 수 있었다. 본 연구에서는 다공 원통형 버너에서의 역화 및 날림한계가 명확하지 않았으나 버너표면의 적열 및 고부하일 때 유속이 상대적으로 빠른 버너 끝단의 불안정한 화염을 근거로 목적에 의해 결정하였다.

Fig. 5는 위의 3가지 버너의 안정 연소 범위를 당량비와 혼합기 유속에 대해서 도시한 것이다. 완전 예혼합 화염임에도 불구하고 전체적으로 넓은 안정 연소 범위를 보이고 있으며 이는 다공의 염공 형태로 인하여 이웃하는 화염들간의 간섭 현상에 의한 화염안정성이 향상되었기 때문이라 생각된다. 역화한계에 있어서는 3가지 버너가 모두 비슷하였으나 날림은 직경이 제일 작은 50 mm의 버너에서 먼저 일어났음을 알 수 있다.

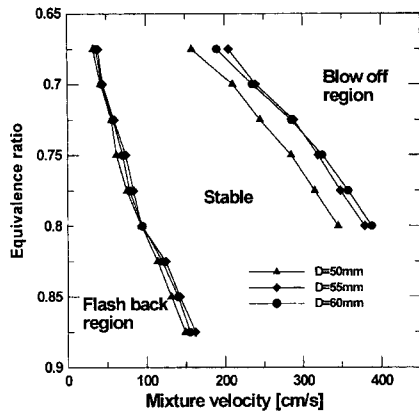


Fig. 5. Flammability of three different burners.

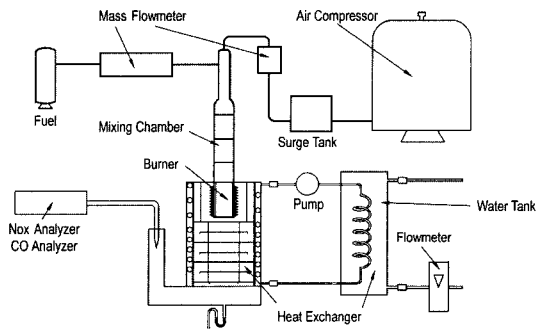


Fig. 6. Schematic of boiler performance test.

2-3. 원통형 버너의 배기특성

Fig. 6은 원통형 버너의 배기특성을 살펴보기 위한 보일러 성능시험장치이다. 본 연구에서 사용한 원통형 열교환기는 앞서 수행된 선행연구를 통하여 제원이 결정·제작되었으며, 그림과 같이 열교환기의 중심에 위치한 원통형 버너의 바로 외측에 알루미늄으로 압출 성형한 편형 열교환기와 그 외부에 난방수 및 온수용의 coil형 열교환기로 구성되어 있다. 그리고 편형 열교환기는 버너 측면에 위치한 상부 편형 열교환기와 하부에 설치된 하부 편형 열교환기로 구별되며, 이들의 형상(제원)은 서로 다르다. 그리고 하부 편형 열교환기 내에는 20장의 배플이 설치되어 있는데 이것은 버너에서 발생한 고온의 연소가스가 하부 열교환기를 지날 때 통과거리를 길게 하고 벽면으로의 충돌효과를 증가시켜 충분한 응축 열교환을 이루게 하기 위한 것이 목적이다. 이러한 역할을 위해 배플은 2종류로서 하나는 환형으로 연소가스의 대부분을 하부 열교환기 중심으로 흐르도록 내부에 홀(hole)을 설치하였고 벽면에서의 열전달 증진과 압력 손실의 감소를 위해 이 환형배플의 끝단과 하부 열교환

기사이에 약간의 간격을 주었다. 다른 하나의 배플은 원형으로, 환형배플에 의해 열교환기 중심으로 모여진 연소가스를 편형 열교환기에 직각으로 접촉하도록 흐름을 바꿔 주는 형상을 가지고 있다. 이러한 배플을 일정한 간격으로 번갈아 설치하였다. 기타 실험장치로는 부하량과 당량비의 조절을 정확히 하기 위하여 공기의 공급은 송풍기 대신 압축기(compressor)로 하였으며, 서지탱크(surge tank) 및 필터를 거쳐 일정한 압력으로 공기용 질량유량계(mass flow meter)로 유입되어 공급·제어하였다. 연료는 버블 미터(bubble meter)로 보정한 LNG 및 LPG용 질량유량계를 이용하여 각각 공급·제어하였다. 연료와 공기의 혼합기는 혼합실(mixing chamber)에서 만들어진 후 버너로 공급되었으며 한편, 냉각수는 전자저울로 보정한 마그네틱 유량계(magnetic flow meter)를 통해 공급되며, 열교환기를 통과한 후 외부로 버려지도록 하였다. 그리고, 난방순환수는 순환펌프에 의해 보일러와 물탱크를 순환하며 열교환을 하도록 하였다.

NOx 및 CO의 시료가스 채취는 비교적 반응성이 적은 석영 프루브를 이용하였으며 반응동결을 위하여 흡입직경을 0.1 mm에서 10 mm로 증가시켰다^{[7][10]}. 채취된 샘플가스는 반응성이 없는 테프론 호스를 통하여 건조장치(1°C로 유지)에서 수분이 제거된 뒤 화학발광법을 이용하는 NOx analyzer(탄소전버터)와 CO측정기(KM9104, Kane-May co.)에 의해 각각 분석되었다. NOx analyzer의 보정은 한국 표준 연구소에서 제작된 표준가스(NO 100.2 ppm)로 행하였다.

Fig. 7은 3종류 버너에 대해서 오염물질 중 NOx의 배출농도를, Fig. 8은 CO의 배출농도를 각각 나타낸다. 본 연구에서는 버너 및 열교환기 재제작의 어려움으로 인하여 각각의 버너가 동일한 염공면적을 갖고 있지 않기 때문에 당량비 0.8일 때의 유속이 약 200 cm/s가 되는

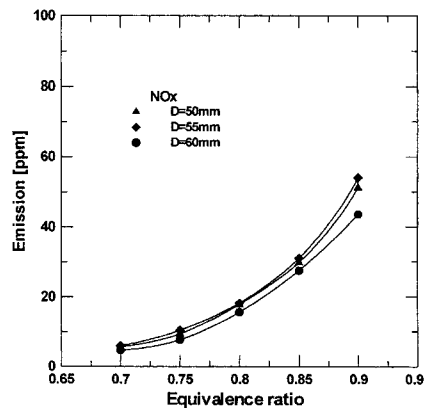


Fig. 7. NOx emission with equivalence ratio.

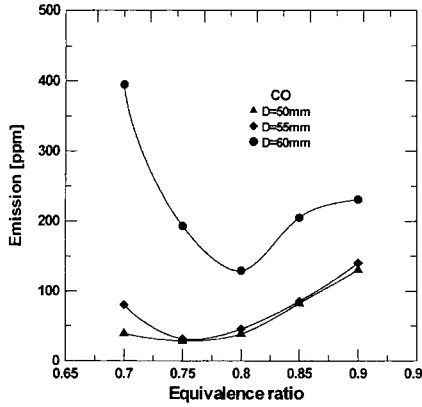


Fig. 8. CO Emission with equivalence ratio.

부하를 기준으로 동일한 연료부하에서 실험을 수행하였다. 그럼에서 보듯이 당량비가 일정할때 버너의 직경 변화에 따른 NOx 배출농도의 차이는 거의 없었으며, 3종류의 버너 모두 당량비가 증가할수록 NOx 배출량은 증가했다. 이것은 NOx의 대부분이 열적 NOx이므로 당량비 증가에 따른 화염온도의 상승 때문인 것으로 보인다^{[11][2]}.

Fig. 8의 CO 배출특성을 살펴보면 3종류 버너 모두 당량비 약 0.75를 기준으로 당량비가 증가할수록 CO 배출농도가 증가한다. 이것은 당량비가 증가할수록 CO를 산화시킬 수 있는 O₂의 유효성이 감소하고 또한 증가하는 온도 때문에 CO₂가 CO로 해리되는 경향이 강해지기 때문이다^[11]. 당량비 0.75 이하에서 CO 농도가 높게 나타나는 것은 부하는 동일하면서 당량비가 낮아지기 때문에 화염의 길이가 길어지고 이로 인해 화염이 열교환기와 가까워지면서 냉각효과(quenching effect)에 의해 영향을 받기 때문이다. 직경변화에 따라서는 50 mm 및 55 mm인 경우 동일한 당량비에서 CO의 배출량에는 거의 차이가 없는 반면 60 mm인 경우에는 상대적으로 높게 나타났다. 이것은 60 mm의 버너에 있어서는 버너 표면과 열교환기 사이의 거리가 타버너에 비해 짧기 때문에 냉각효과를 두드러지게 받는 것을 의미한다.

Fig. 9는 직경 50 mm인 버너를 보일러에 장착했을 때, 부하량에 따른 배기특성을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 앞의 당량비 변화에 따른 배기특성 실험결과로부터 NOx와 CO가 비교적 적게 배출되는 당량비인 0.7, 0.75 및 0.8의 경우에 대해서 각 버너별로 부하량을 변화시키면서 그에 따른 오염물질 배출특성과 성능을 알아보았다. 각 당량비에서 NOx 배출농도는 모두 18 ppm 이하로 나타났으며 부하량에 따른 변화는 무시할만하였다. CO의 배출농도는 전체적으로 부하가 높아질수록 증가하는데 당량비 0.75와 0.8일 때는 최고부하(약 20,000

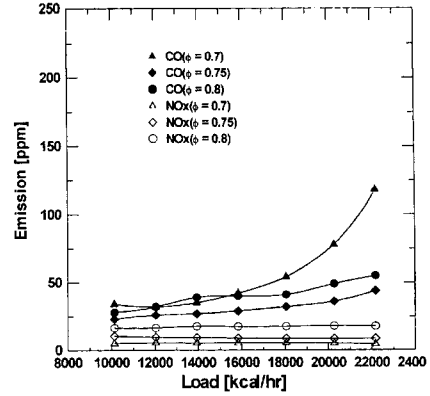


Fig. 9. Emission characteristics with burner heating load and equivalence ratio [$D_b=50$].

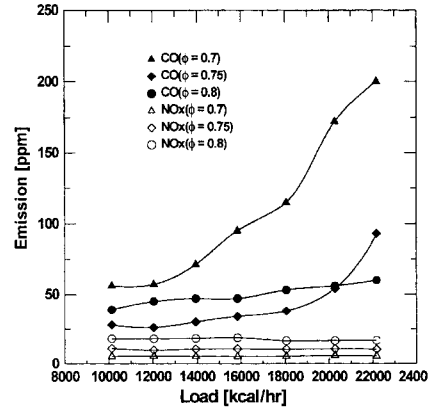


Fig. 10. Emission characteristics with burner heating load and equivalence ratio [$D_b=55$].

kcal/hr)에서도 55 ppm 이하였으나 당량비 0.7에서는 부하가 약 18,000 kcal/hr부터 급상승하기 시작해서 최고 118 ppm을 나타내었다. 이 결과로부터 직경이 50 mm인 버너는 당량비 0.7에서 부하량이 약 18,000 kcal/hr 이상일 때 현저하게 냉각효과에 의한 영향을 받음을 알 수 있다.

Fig. 10은 직경 55 mm인 버너에 대한 결과를 나타내고 있다. NOx 배출농도는 50 mm의 경우와 마찬가지로 18 ppm 이하를 나타내고 있고, CO 농도는 당량비가 0.7에서 부하량이 약 14,000 kcal/hr 일 때부터 급격한 상승을 보여 최고 200 ppm까지 높아졌다. 여기에서 주목할 만한 것은 앞의 직경 50 mm인 버너일 때와는 달리 당량비가 0.75일 때도 고부하 범위의 부하량 약 20,000 kcal/hr에서부터 CO 배출농도가 급격한 상승을 보여 최고 93 ppm까지 나타난다는 것이며 이는 버너에서 열교환기까지의 거리가 2.5 mm 줄어들기 때문에 화염이 보

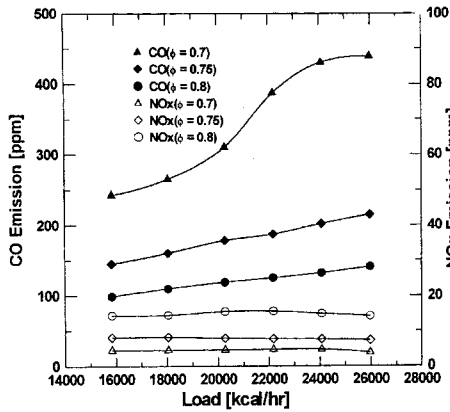


Fig. 11. Emission characteristics with burner heating load and equivalence ratio [D_b=60].

다 낮은 부하량에서 일찍 냉각효과의 영향을 받는다는 것을 의미한다.

Fig. 11은 직경이 60 mm인 버너의 배기특성을 나타낸다. 이 버너는 직경이 50 mm와 55 mm인 버너보다 상대적으로 큰 연공면적을 가지고 있기 때문에 유속을 기준으로 하여 보다 높은 부하까지 범위를 확장하였다. 실험결과에서 보듯이 NOx 배출농도는 전체적으로 16 ppm 이하를 보였으나 CO 농도는 당량비 0.7에서 부하가 16,000 kcal/hr일 때 243 ppm, 26,000 kcal/hr일 때 440 ppm으로 전체적으로 상당히 높게 나타났다.

이러한 결과들을 종합적으로 분석해 보면 각각의 당량비에서 NOx 농도는 18 ppm 이하로 매우 낮게 나타났으며 CO의 농도는 버너 직경이 증가할수록, 부하가 증가할수록 높게 나타났다. 따라서 버너 직경 결정의 가장 중요한 인자인 CO 배출농도에서는 직경이 50 mm인 버너에서 가장 낮게 나타났으나, 화염 안정성 면에서 불리한 조건을 가지고 있으며 또한 직경이 상대적으로 작기 때문에 보다 높은 부하에서 운전하고자 할 때 버너의 길이가 지나치게 길어져야 하는 단점 등을 갖고 있다. 이러한 문제점을 고려하여 보일러에는 직경 55 mm의 버너를 채택하여 사용하기로 하였다. 그리고 CO 배출농도를 보다 낮추기 위한 방안으로 당량비와 부하를 동시에 제어하는 비례제어 방식을 보일러에 적용하였다. 이와 같은 방법을 사용하면 오염물질 배출 측면에서도 만족할 만한 효과를 얻을 뿐만 아니라 버너의 운전영역을 상당히 넓힐 수 있다.

2.4. 원통형 버너의 제어조건

본 연구에서는 여러 가지 실험들에 의해 결정된 최적의 버너(D_b=55 mm)에 대해서 사용연료를 LNG와 LPG

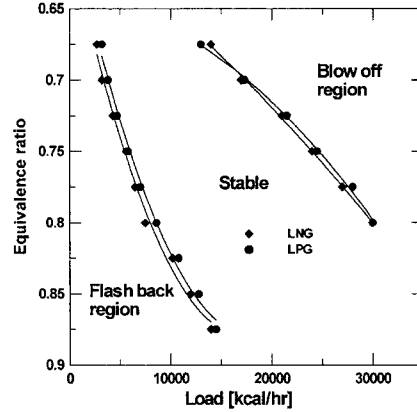


Fig. 12. Flammability of burner with fuels.

로 하였을 때의 화염안정성 비교 및 비례제어 경로 결정 등의 버너의 운전조건을 살펴보았다.

Fig. 12는 LNG와 LPG를 연료로 사용하는 경우의 공급 연료 열량 및 당량비를 변화시키면서 측정된 안정 연소 범위를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 두 연료의 화염안정성에는 별다른 차이가 없음을 알 수 있다. 당량비 0.8에서 turn-down ratio가 약 4:1 정도의 넓은 연소범위를 나타내고 있으며 가정용 기기의 안전이라는 측면을 고려하여 turn-down ratio는 넓을수록 좋기 때문에 대각선 방향의 경로를 따라 비례제어를 하도록 하였다.

Fig. 13은 LNG 연료에 대한 버너의 안정 운전영역내에서 비례제어를 실시할 부하량에 따른 당량비를 정하여 6개의 지점으로 나누어 표시한 것으로, 각 점의 상세한 부하량과 당량비를 Table 1에 나타내었다. 앞서 수행된 여러 실험의 결과를 토대로 했을 때 당량비 0.68 이하에서는 불완전 연소가 발생이 빈번하였고 당량비 0.85

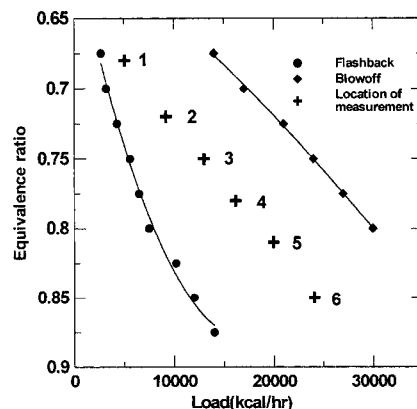


Fig. 13. Measurement location of on boiler control path.

Table 1. Details of location of measurement.

Location of measurement	Equivalence ratio	Load (kcal/hr)
1	0.68	5,068
2	0.72	9,187
3	0.75	12,988
4	0.78	16,156
5	0.81	19,957
6	0.85	24,076

이상에서는 NOx와 CO가 다량 배출되기 때문에 이처럼 운전조건을 결정하였다. 또한, 본 연구에서 관심을 갖고 있는 버너는 난방부하 20,000 kcal/hr로서 효율을 고려한 이때의 연료부하는 약 22,500 kcal/hr 정도이나 실험상의 편리와 보다 폭 넓은 실험을 위하여 최고 연료부하를 24,000 kcal/hr로 정하였다. LPG 연료에 대해서도 동일한 당량비와 부하에서 운전하도록 하였다.

3. 보일러의 성능시험

선행연구에서의 성능시험은^[16] 당량비를 일정하게 하고 부하량을 변화시키면서 수행되었기 때문에 이와 같은 운전 방식에서는 변화하는 부하량에 대한 최적 당량비를 적용할 수가 없었다. 따라서, 본 연구에서는 앞선 여러 연구결과를 토대로 하여 저부하에서는 저당량비, 그리고, 고부하에서는 고당량비에서 운전함으로써 오염물질 배출특성 및 각종 성능을 살펴보았다.

Fig. 14는 LNG를 연료로 사용했을 때 Fig. 13과 Table 1에 나타난 지점에서의 보일러의 종합 성능을 나타내는 결과이다. 효율은 지점 1에서 지점 7로 움직임에 따라 약 100%(저위발열량 기준)에서 95%까지 조금씩 낮아지

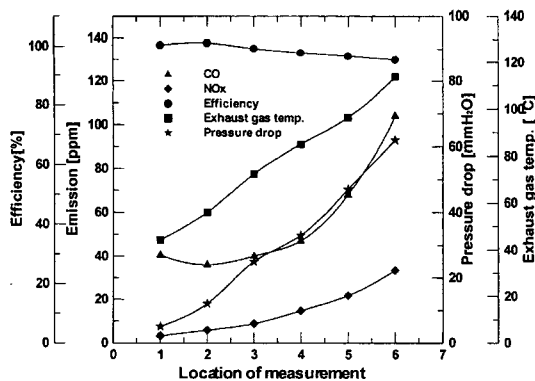


Fig. 14. Overall performance of condensing boiler [LNG].

며 배기가스 온도는 약 45°C에서 115°C까지 증가하였다. 압력손실은 약 5~60 mmH₂O 범위로 양호한 결과를 보이고 있다. NOx 배출농도는 4 ppm에서 33 ppm까지 당량비 및 부하가 높을수록 증가하는데, 이것은 부하가 높아질수록 당량비 증가하고 이에 따라 화염면 후류의 연소가스 온도가 높아짐에 따른 고온 열적 NOx 증가가 원인이다. CO 배출농도 역시 약 40 ppm에서 104 ppm까지 유사한 경향의 증가를 보이는데, 이것은 앞에서 언급했듯이 CO를 산화시키는 O₂의 유효성 감소와 높은 온도에서 CO₂가 CO로 해리되는 경향이 강해지기 때문이다. 그리고, 지점 4부터는 CO의 급격한 증가를 보이는 것은 당량비가 높아지더라도 부하 또한 증가하기 때문에 화염길이 앞에서 지점들보다 길어지고 그로 인해 냉각효과에 의한 영향이 더해진 결과라 사료된다. 한편, 지점 1에서 효율이 다소 낮아지고 더불어 CO 배출농도가 조금 증가하는 것은 당량비가 낮아짐에 따라 불완전 연소가 발생하기 때문이다.

Fig. 15는 LPG를 연료로 사용했을 때 보일러의 종합 성능을 나타낸다. 효율과 배기가스 온도, 압력 손실 등은 LNG 연료의 결과와 비슷한 경향을 보임을 알 수 있다. NOx 배출농도는 약 5 ppm에서 50 ppm, CO의 경우에는 28 ppm에서 133 ppm까지 증가하였는데 이 결과는 LNG에 비해서 전반적으로 다소 높은 수치이다. 이것은 LPG 연료의 주된 성분인 C₃H₈이 LNG의 주된 성분인 CH₄에 비해 화염온도가 높고 화염의 길이도 상대적으로 길며, H에 대한 C의 비율도 LPG가 높기 때문이라 생각된다^[17].

본 연구에서 관심을 갖고 있는 난방부하 20,000 kcal/hr에서의 연료부하는 약 22,500 kcal/hr가 되며 따라서, 연료부하 22,500 kcal/hr에서 각 연료의 NOx와 CO의 배출농도를 살펴보면 LNG 연료의 경우에는 NOx 배출농

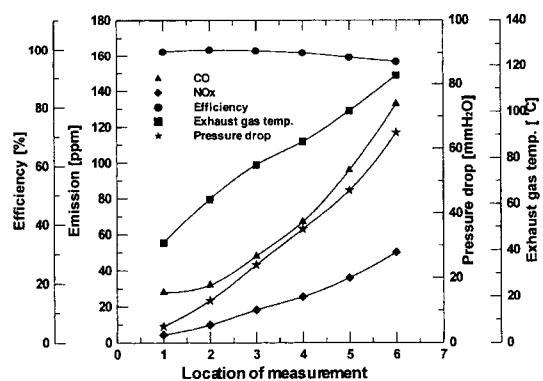


Fig. 15. Overall performance of condensing boiler [LPG].

도가 26 ppm, CO 배출농도가 85 ppm으로 환경마크 기준¹²⁾(O₂=0% basis NOx 50 ppm, CO 100 ppm)을 충분히 만족하나 LPG의 경우는 NOx가 41 ppm, CO가 113 ppm으로 CO의 배출농도가 다소 초과함을 보이고 있다. 이러한 문제에 있어서도 향후 버너와 열교환기의 연구 및 설계개선을 통하여 CO의 배출농도를 낮출 수 있다고 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 난방부하 20,000 kcal/hr의 용량을 목표설계된 응축형 가스보일러에 적용될 운전 영역이 보다 넓고 비례제어에 적합한 버너의 설계조건을 제시하였다. 이를 위해 먼저 버너와 열교환기 사이의 거리를 최적화 하기 위한 평면버너 실험을 수행하였고, 직경이 각각 50, 55 및 60 mm인 버너를 제작하여 화염안정성과 당량비, 부하량 변화에 따른 배기특성 및 성능 실험을 수행하였다. 최적의 버너를 콘덴싱 가스보일러에 적용하여 연료의 종류에 따른 비례제어 종합성능, 즉 안정 연소 범위, 난방효율, 배기가스 특성 및 압력손실 등을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 버너와 열교환기 사이의 거리에 따른 오염물질 특성을 검토하고자 평면버너 실험을 수행하여 적합한 거리가 41 mm에서 46 mm사이임을 알았다.
- 2) 직경이 각각 50, 55 및 60 mm인 원통형 버너를 제작하여 버너의 화염안정성, 당량비와 부하량에 따른 배기특성을 검토하여 직경 55 mm인 버너가 최적임을 확인하였다.
- 3) 최적인 버너에 있어서 연료에 따른 화염안정성을 비교하여 큰 차이가 없음을 알았고, 이때 turn-down ratio는 약 5 : 1까지 상승했다.
- 4) 비례제어에 의해 난방부하 20,000 kcal/hr(연료부하 22,500 kcal/hr)로 운전할 경우, 효율은 약 97%까지 달성할 수 있었으며 LNG의 경우 NOx와 CO의 배출량이 각각 26 ppm, 85 ppm(O₂=0%, wet basis)으로 환경마크 기준(O₂=0% basis NOx 50 ppm, CO 100 ppm)을 충분히 만족하고, LPG의 경우는 각각 41 ppm, 113 ppm으로 CO 배출량이 기준을 약간 상회하였다. 이는 앞으로 지속적인 연구를 통하여 충분히 보완될 수 있는 수준이라 사료된다.

후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행한 에너지기술시범적

용사업(과제번호 : 1999-E-ID06-P-01)으로 진행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다. 또한, 본 연구에 참여해 주신 린나이코리아(주), 라니산업(주)과 제작을 도와주신 덕성 ENG의 관계자 여러분께도 깊은 감사드립니다.

참고문헌

1. Miller, J.A. and Bowman, C.T.: "Mechanism and Modeling of Nitrogen Chemistry in Combustion", Progress in Energy and Combustion Science, 15, 23 (1989).
2. Driscoll, J.F., Chen, R.-H. and Yoon, Y.B.: "Nitric Oxide Levels of Turbulent Jet Diffusion Flames : Effect of Residence Time and Damkohler Number", Combustion and Flame, 88, 37-49 (1992).
3. Turns, S.R.: "An Introduction to Combustion", McGraw-Hill (1996).
4. Wunning, J.A. and Wunning, J.G.: "Flameless Oxidation to Reduce Thermal NO-Formation", Progress in Energy and Combustion Science, 23, 81-94 (1997).
5. 이창언, 금성민, 정영식, 이규영: "저 NOx 응축형 가스보일러 개발에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제 25권 제 2호, pp. 235-243 (2001).
6. 이창언, 금성민, 정영식: "저 NOx 응축형 가스보일러 개발에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제 25권 제 2호, pp. 244-251 (2001).
7. Fristrom, R.M. and Westenberg, A.A.: "Flame Structure", McGraw-Hill, pp. 177-203 (1965).
8. England, C.: "Sampling Nitric Oxide from Combustion Gases", Combustion and Flame, 20, 439-442 (1973).
9. Williams, A., Woolley, R. and Lawes, M.: "The Formation of NOx in Surface Burners", Combustion and Flame, 89, 157-166 (1992).
10. 민대기, 신현동: "다공성 물질에 의한 열 재순환 화염에 관한 실험적 연구(I)", 대한기계학회논문집, 12, 5, 1113-1120 (1988).
11. Cannon, S.M., Brewster, B.S. and Smoot, L.D.: "Stochastic Modeling of CO and NO in Premixed Methane Combustion", Combustion and Flame, 113, 135-146 (1998).
12. 환경마크협회: "환경마크 대상제품 및 부여기준((25) 가스 보일러)" (1999).