

예혼합 가스버너와 열교환기의 최적화 연구

장 기 현 · 이 창 언 · †이 강 주**

*인하대학교 기계공학과 대학원, 인하대학교 기계공학과,

**인하공업전문대학 기계과

(2003년 8월 30일 접수, 2003년 9월 24일 채택)

The Study on the Optimization of Premixed Gas Burner and Heat Exchanger

Gi Hyun Jang · Chang Eon Lee* and Kang Ju Lee**

Inha University Graduate School, Department of Mechanical Eng.

**Inha University, Department of Mechanical Eng.*

***Inha Technical College, Department of Mechanical Eng.*

(Received 30 August 2003 ; Accepted 24 September 2003)

요 약

본 연구에서는 연소가스의 잠열을 활용함으로써 에너지를 절약하고 배기가스 속의 오염 물질을 저감할 수 있는 콘덴싱 가스보일러의 예혼합버너와 열교환기를 최적화하기 위한 실험을 수행하였다. 본 연구에서 사용된 가스보일러의 열교환기는 상부, 하부 및 코일 열교환기 3개부분으로 구성되어 있다. 상부 열교환기는 예혼합버너를 둘러싸고 있으며 하부 열교환기는 상부열교환기 하단에 설치되어 있다. 그리고, 코일형 열교환기는 상부와 하부 열교환기의 바깥 표면을 감싸고 있는 구조로 되어 있다. 본 연구를 통하여 설계된 보일러의 TDR은 당량비 0.75~0.80 부근에서 약 4:1이며 열효율이 97%로 나타났다. 또한, NOx 및 CO 배출농도는 당량비 0.8 부근에서 각각 20ppm과 140ppm의 낮은 수치를 보였으며 버너의 직경을 기존의 60mm에서 50mm로 변경한 결과, CO의 배출농도가 50ppm까지 현저히 낮아짐을 알 수 있었다.

Abstract-This study was carried out to optimize premixed burner and heat exchanger of the condensing gas boiler which can save energy by utilizing latent heat of combustion gas and reduce pollutant in exhaust gas. The heat exchanger of the gas boiler was composed of three parts, which were an upper, lower, and coil heat exchanger. The upper heat exchanger was placed outside of the premixed burner and a lower heat exchanger was located under the upper heat exchanger. And, coil heat exchanger rounded the outer surface of an upper and lower heat exchanger. The boiler designed by this research reaches turn-down ratio 4:1 in the domain of equivalence ratio 0.75~0.8 and thermal efficiency of 97%. Emission of NOx and CO concentration was under 20ppm and 140ppm at equivalence ratio 0.8. When diameter of the burner is replaced from 60mm to 50mm, emission of CO was reduced about 50ppm remarkably.

Key words : premixed burner, condensing boiler, heat exchanger, emission

1. 서 론

현재 국내에서 사용되고 있는 가스보일러의 대부분이 분체버너를 이용하며, 열교환기와 버너가 상하로 배치되어 있는 구조로 되어 있어 수증기가 응축하여 낙하하면 화염이 불안정하게 된다. 따라서, 배기가스에 포함된 수증기가 응축되지 않도록 고온의 배기가스를 강제 배기시키므로 배기가스중의 잠열을 이용하지 못하여 구조적으로 열효율이 낮을 수밖에 없다. 그리고 분체버너의 화염은 완전예혼합 화염에 비하여 화염길이 길어 고온 연소 생성물이 화염내 체류시간이 길어져 NOx배출량이 비교적 많아진다.^{[1][2][3]}

위와 같은 기존 보일러들의 문제점을 개선하기 위하여 선행 연구에서 에너지 절약과 동시에 환경오염을 줄일 수 있는 저 NOx 응축형 가스 보일러를 이미 개발하였고^[4] 본 연구에서는 보일러의 핵심 기술인 버너와 열교환기의 최적화를 위한 연구의 일환으로 환경오염물질을 최소화 할 수 있는 버너를 설계하고 배플의 변화에 따른 열교환기의 효율을 검토하여 버너와 열교환기의 최적설계 조건을 제시하고자 한다. Fig. 1은 본 연구에서 개발한 예혼합 버너를 이용한 응축형가스 보일러의 개략도이다. 버너 및 열교환기는 원통형이며, 버너의 연소 방식은 예혼합방식이며, 짧은 화염면 직후에 열교환기를 설치하여 연소가스의 온도를 낮춤으로써 NOx발생량을 현저히 저감시킬 수 있는 구조로 설계된 것이다.

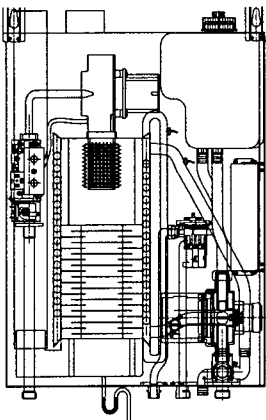


Fig. 1 Schematic of developing boiler.

2. 버너와 열교환기

2.1. 버너

Fig. 2는 본 연구를 통해 개발하고자 하는 응축형 가스보일러에 사용될 다공 예혼합 원통형 버너의 개략도이다.

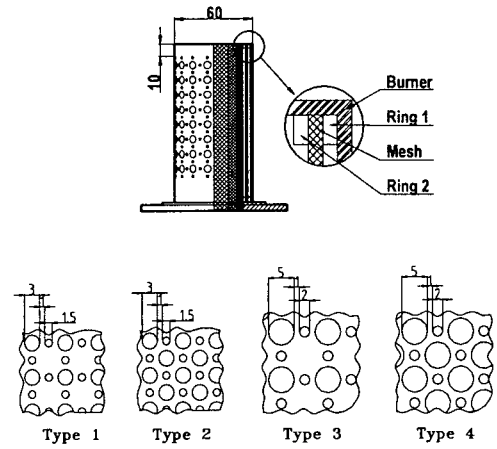


Fig. 2 Schematic of burner and burner surface types.

화염구의 배치 형태는 주염구 주변에 작은 보염구로 구성된 단위셀 버너를 이용한 기초실험을 통해 원통형 버너 표면의 주염구와 보염구의 직경 및 주염구와 보염구사이의 최적 거리를 선정하여 4종류의 배열형태를 갖는 시제품 원통형 버너를 제작하였다. Type 1,2는 주염공 직경 3mm, 부염공 직경 1.5mm 염공간격은 1mm이고 Type 3,4는 주염공 5mm, 부염공 2mm, 염공간격은 1mm이다. 이와 같이 제작한 4가지 원통형 버너를 대상으로 안정연소범위와 오염물질특성등을 검토하였다. 다공 원통형 버너에서는 역화 및 blow-off한계가 명확하지 않지 않기 때문에 버너 표면의 적열 및 버너 상단의 불안정한 화염을 근거로 목측에 의해 결정하였다. Fig. 3은 4가지 버너중 안정 연소 범위가 비교적 넓게 나타난 주염공직경 3mm인 Type 2와 주염공 직경 5mm인 Type 3의 안정 연소 범위를 도시한 것이다.

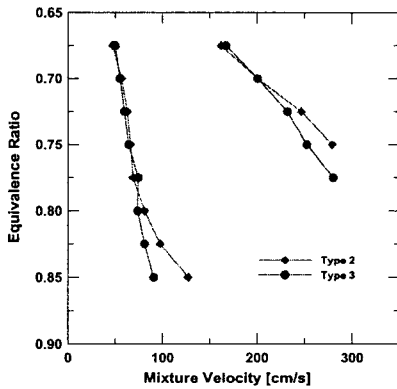


Fig. 3 Stability region of burner.

그림에서 보듯이 운전 예정 영역인 당량비 0.75~0.8근방에서 Turn-down ratio가 약 4 : 1 정도로 비례제어에 적합하리라 여겨진다.

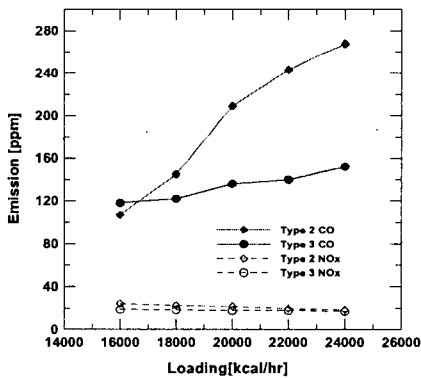


Fig. 4 Emissions of burners.

Fig. 4는 Type2와 Type3의 버너를 대상으로 당량비를 0.8로 고정하고 가연한계 내에서의 오염물질 배출특성을 나타낸 것이다. NOx 배출특성을 보면 두 버너 모두 측정된 모든 부하량에서 약 25ppm이하로 매우 양호했다. 그러나, CO의 배출량은 두 버너 사이에서 많은 차이를 보였다. Type3의 경우 부하량이 증가할수록 CO배출량이 증가하나, 모든 부하량에서 약 150ppm이하로 나타났다. Type2의 경우 낮은 부하에서 Type3과 유사한 CO배출량을 보였으나 부하량이 증가함에 따라 CO의 배출량이 급속하게 증가하였는데, 이는 작은 주연구에서는 홀 면적당 발열량이 적어 화염 지지부의 온도가 낮아지기 때문에 화염구에서의 냉각에 의한 현상으로 기인된다. 이와 같은 안정

연소 범위와 오염물질특성 실험결과를 토대로 Type3을 본 보일러에 사용될 최종버너의 제원으로 결정하였다.

2.2. 열교환기

Fig. 5는 열교환기의 개략도이다. 열교환기는

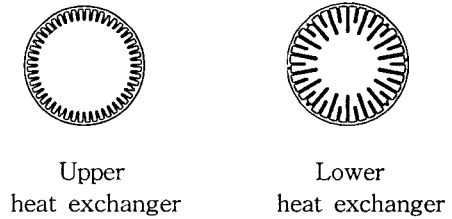
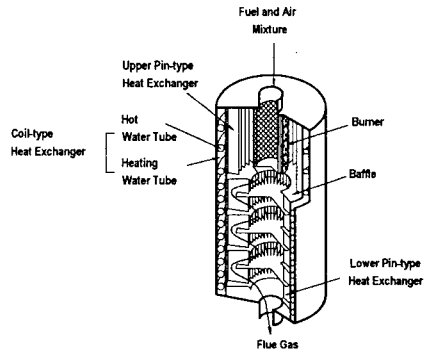


Fig. 5 Schematic of heat exchangers.

선행연구와 마찬가지로 [5][6] 그림 아래편에 도시한 알루미늄으로 압출성형한 핀형 열교환기와, 그 외부에 난방수 및 온수 유로를 형성하면서 핀형 열교환기를 통하여 전달된 연소열을 난방 혹은 급탕용 온수에 전달하는 코일형 열교환기로 구성되어 있다. 세부적으로, 핀형 열교환기는 버너 바로 측면에 위치하며 핀의 길이가 짧은 상부 열교환기와 연소가스의 체류시간을 길게 하여 응축열교환이 이루어지도록 배플이 설치되어 있는 하부열교환기로 구성되어 있다. 그리고, 코일형 열교환기에서는 온수(급탕수)가 스테인레스 관을 통해 흐르고 난방수는 이 관 사이를 나선형으로 돌며 흐르는 구조로 되어있다. 특히, 본 연구에서는 열교환기의 최적화를 위해 배플의 면적 변화시 열교환기의 성능을 검토하고자 한다. 이를 위해 2종류의 배플(배플 I, 배플 II)을 설계하였고 일정한 간격으로 번갈아 배치하였다.

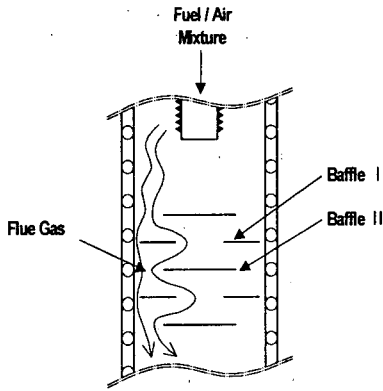


Fig. 6 Schematic of baffles in heat exchanger.

Fig. 6은 열교환기에 설치된 배플의 개략도이다. 배플 I은 연소가스의 대부분을 하부열교환기 중심으로 흐르도록 내부에 홀(hole)을 설치하였고 일부는 열교환기 벽면에서의 열전달 증진과 압력손실의 감소를 위해 배플 끝단과 하부열교환기 사이에 간격을 설치하였다. 배플 II는 배플 I에 의해 열교환기 중심으로 모여진 연소가스를 핀과 핀사이에 접촉하도록 흐름을 바꿔 주는 형상을 가지고 있다. 배플 I의 cut-off ratio를 동일하게 하고 배플 I의 내부 홀(hole)면적과 배플 I의 끝단과 열교환기 사이의 간격의 면적비를 60:40, 80:20, 85:15로 변화시켰고 배플 II는 동일하다. 배플 I 끝단과 열교환기 사이의 간격이 가장 큰 것이 60:40이고 가장 작은 것이 85:15이다. Fig. 7은 배플 I의 변화시 부하량에 대한 효율과 압력손실을 도시한 것이다. 그림에서 보듯이 배플의 개구 면적을 동일하게 설계하였지만 배플 I의 끝단과 열교환기의 간격이 작을수록 효율이 증가하였다. 60:40의 경우 배플과 열교환기 벽면 측의 간격이 커서 고온의 배기가스가 열교환기 내에서 오래 체류하지 못하고 벽면을 타고 직접 배기되는 것으로 사료된다. 효율측면에서만 고려할때는 배플과 열교환기 사이의 간격이 좁을수록 열교환 성능이 우수하지만 버너내의 압력손실은 크게 증가한다. 버너내의 압력손실은 보일러의 시제품 제작시 송풍기의 풍량과 풍압을 결정하는데 중요한 인자이므로 압력손실이 크면 송풍기의 용량을 크게 해야하는 문제점이 있기 때문에 효율과 압력손실을 고려하여 80:20의 배플을 결정하여 실험을 수행하였다.

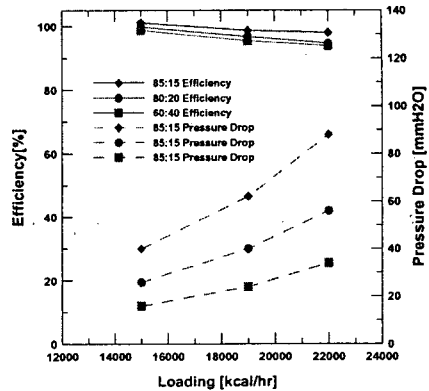


Fig. 7 Efficiency and pressure drop with loading.

3. 보일러의 성능

Fig. 8은 보일러의 성능을 시험하기 위한 장치의 개략도를 나타낸 것이다. 연료는 질량 유량계를 통해 공급되며, 배기가스 온도와 물의 온도는 T-type 열전대로 측정하여 data logger(HP 3852A)로 받아 평균처리하였다. 보일러의 효율측정은 가스 온도 보일러의 한국산업규격(KS B 8109)을 토대로 측정하였다.^[7]

배기가스의 주된 오염물질인 CO와 NOx는 석영 프루브를 이용하여 채취한 후^[8], cooler에서 수분이 제거된 뒤 화학발광법을 이용하는 NOx 분석기(탄소 converter)와 CO 측정기(KaneMay co.)로 각각 분석하였다.

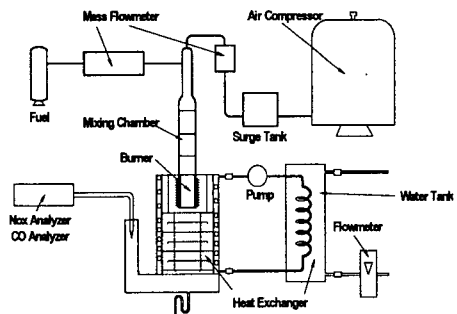


Fig. 8 Schematic of experimental apparatus for heating water performance test.

Fig. 9는 버너의 부하를 22,000kcal/hr로 고정 한 후 각 당량비에 따른 보일러의 각종 특성을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 당량비가 커질수록 화염 온도의 상승으로 열교환 효율은 약 94%에서 97%까지 조금씩 상승한다. 당량비에 따른 배기가스의 특성을 보면 보일러 배기가스중의 NOx는 대부분 thermal NOx이므로 당량비가 커질수록 화염온도의 상승과 함께 증가하고, 공기 과잉 상태이거나 부족할 때 많이 발생하는 CO는 당량비 0.8근방에서 최소량이 된다. 당량비가 0.8보다 작아지면 CO의 양이 현저히 증가하는데 이는 당량비가 작아질수록 화염온도가 낮아져 불완전 연소가 발생함에 기인한다. 위 결과를 보면 당량비 0.8근방에서 CO의 양이 최소이며, NOx도 약 20ppm정도이므로, 보일러를 당량비 0.8근방에서 운전하는 것이 최적임을 알 수 있다.

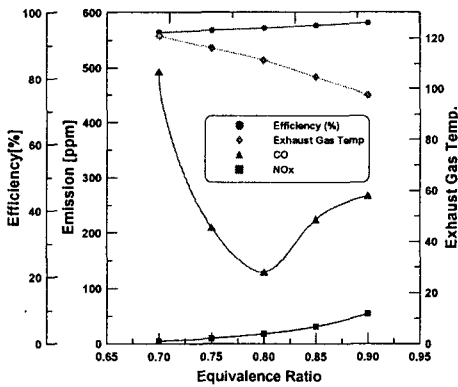


Fig. 9 Performance with equivalence ratio.

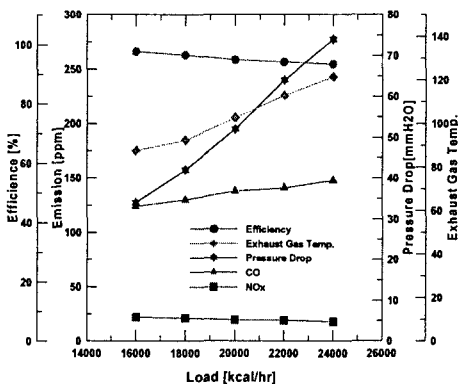


Fig. 10 Performance with loading.

Fig. 10은 당량비를 0.8로 고정하고 부하량을 변화하며 그에 따른 보일러의 특성을 나타낸 것이다. 실험결과 부하가 커질수록 유량이 증가하면서 열교환 효율이 97.6%에서 93.4%로 조금씩 낮아지며 배기가스 온도와 압력손실은 높아진다. 이 결과들을 보면 배기가스가 다소 높게 나타났는데 배기가스를 낮춰 효율을 증가시킬수 있는 방안으로 앞에서 실험한 배플 I 을 85:15로 교체한다면 배기가스의 온도를 낮춰 효율을 향상시킬 수 있을 것이라 예상된다.

오염물질 중 NOx배출특성을 보면 부하가 증가함에 따라 감소하는데 이러한 경향은 일반적인 버너와는 정반대의 경향이며, 그 이유는 부하가 증가할수록 화염길이가 길어져 화염과 열교환기와의 거리가 가까워지므로 화염면 후류의 연소가스의 온도가 감소하여 고온에서 생성되는 thermal NOx의 감소에 기인한다. CO배출량은 부하의 증가와 함께 증가하는데 이는 부하가 증가할수록 화염길이가 길어져 열교환기와 화염간의 거리가 가까워져 화염온도가 떨어져 냉각효율에 의한 CO의 양이 증가함에 기인한다. 주요 오염물질인 NOx, CO배출량은 본 보일러의 운전 영역인 난방부하 20,000kcal/hr에서 각각 약 20ppm과 140ppm으로 매우 양호했으나 CO배출량이 환경부에서 시행하고 있는 환경 마크 인증 기준^[9](O₂ = 0% basis, NOx: 50ppm, CO:100ppm)을 약간 상회했다.

4. 평면 버너 및 열교환기

본 연구에서는 CO배출량을 줄이기 위한 방안으로 버너와 열교환기 사이의 거리에 따른 오염물질 배출특성을 검토하고자 원통형 버너와 열교환기를 평면으로 모사한 평면 버너와 열교환기를 제작하여 버너와 열교환기의 거리를 변화시켜가며 오염물질 배출특성을 검토하였다. Fig. 11은 평면 버너와 열교환기를 도시한 것으로 크게 버너와 열교환기로 구분되며, 평면 열교환기 후면에는 냉각수의 흐름방향이 코일형 열교환기에서의 냉각수 흐름방향과 유사하도록 설치하였다.

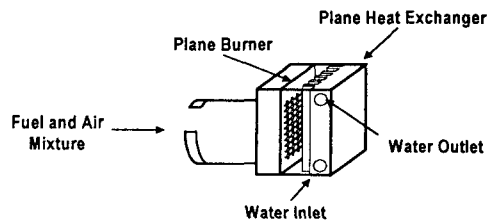


Fig. 11 Schematic of plane burner and heat exchanger.

Fig. 12는 당량비 0.8일 때 열교환기와 버너 간의 NOx와 CO의 배출특성을 나타낸 것이다.

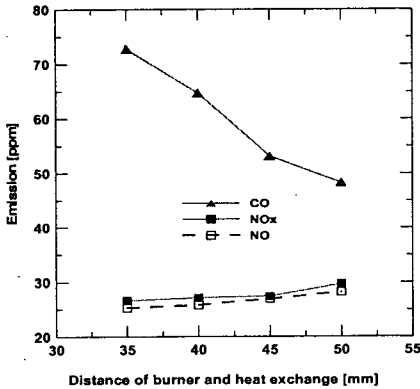


Fig. 12 Emission characteristics with distance of burner and heat exchanger.

실험결과 버너와 열교환기의 거리가 가까울수록 NOx생성량이 감소하는데 이는 연소가스의 온도가 낮아져 고온에서 장시간 체류시 발생하는 thermal NOx의 생성량이 감소함에 기인한다. 그러나 NOx의 감소량은 미소하다 할 수 있다. 반면 CO의 배출량은 거리가 가까울수록 급격하게 증가하는데 이는 화염면 후류에서 열교환기 벽면에서의 냉각효과에 의한 불안전 연소가 발생함에 기인한다. 위 실험결과를 토대로 현재 42mm인 원통형 버너와 열교환기의 거리를 47mm로 늘리기로 결정하였다. 버너와 열교환기의 거리를 늘리는 방법중에 열교환기를 크게 제작하는데에는 여러 어려움이 있어 버너의 직경을 현재 60mm에서 50mm로 줄여 보일러의 성능실험을 수행하였다.

5. 직경 50mm버너의 사용시 보일러의 배기가스 특성 및 성능

Fig. 13은 직경 60mm버너와 50mm버너를 당량비 0.8로 고정하고 부하량을 변화하며 배기가스의 특성을 비교한 것이다.

NOx배출량은 직경 50mm버너에서 약 5ppm 정도 많이 배출되나 그 증가량은 미소하다. CO배출량은 현저히 감소하여 10,000kcal/hr에서 약 25ppm이던 것이 20,000kcal/hr에서는 약 55ppm까지 증가하나 직경60mm에 비해 약 1/3

정도로 줄어들며, 이런 결과는 앞에서 실험한 평면버너와 열교환기의 실험결과와 일치한다. 그러나, 환경마크인증기준을 만족시키고 있다하여도 버너 직경의 감소로 인해 보일러의 효율이 지나치게 감소한다면 직경 50mm버너를 사용할 수 없기 때문에 보일러의 성능을 검토하였다.

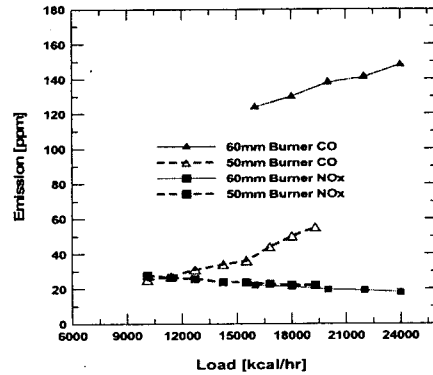


Fig. 13 Emission characteristics with burner diameter.

Fig. 14는 직경 50mm버너를 당량비 0.8로 고정하고 부하량을 변화하며 보일러의 성능을 측정한 결과를 도시한 것이다.

부하량 10,000kcal/hr에서 20,000kcal/hr로 증가함에 따라 난방효율은 103%에서 95.6%로 감소했고 배기가스의 온도는 60.5°C에서 103°C로 증가하였다. 실험결과 동일한 부하량에 대해 직경 60mm버너를 이용한 결과와 비교할 때 효율면에서 거의 차이가 없어 개발한 보일러의 버너로 사용시 배기가스 측면에서 매우 유리하다는 결론을 내렸다.

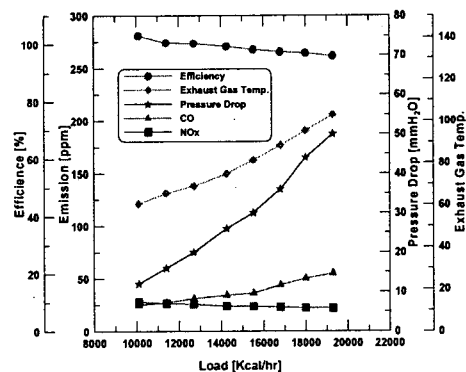


Fig. 14 Performance with loading. [diameter 50mm burner]

6. 결 론

본 연구에서는 난방부하 20,000kcal/hr의 용량을 목표로 설계된 응축보일러에 적용될 다공원통버너와 하부 열교환기에 설치될 배플을 최적화 하였다. 그리고 CO농도와 NOx농도의 최적화를 위해 원통형 버너와 열교환기를 평면으로 모사한 평면버너와 열교환기를 제작하여 버너와 열교환기의 거리를 변화시켜가며 최적 거리를 검토하였다. 그리고, 개발된 가스보일러를 대상으로 난방성능, 배기가스특성, 압력손실, 안정연소범위 등을 검토하여 다음과 같은 결론을 내렸다.

1. 최적의 버너제원을 결정하였으며 버너의 turn-down ratio는 당량비 0.8부근에서 약 4:1로 비례 제어운전에 적합함을 알 수 있었다.
2. 60:40, 80:20 85:15 등 3가지 서로 다른 배플을 제작하여 효율, 압력손실 등을 결과를 분석하여 80:20의 배플을 사용하여 실험을 수행하였다.
3. 넓은 부하범위에서 약 97%의 난방효율을 달성하였으며 공급압력이 높은 팬을 사용하여 85:15의 배플을 열교환기에 장착하는 경우, 3~4%가량의 효율향상이 예상할 수 있었다.
4. 부하량 20,000kcal/hr와 당량비 0.8조건에서 직경 60mm버너 사용하는 경우, NOx와 CO의 배출농도는 각각 약 20ppm과 140ppm정도로, CO 배출농도가 다소 높았으나 기초 실험결과를 토대로 50mm버너를 제작하여 배기가스 특성을 검토한 결과 효율과 NOx의 큰 변화없이 CO배출량을 약 2/3정도 줄일 수 있었다.

후 기

본 연구는 2002년도 인하공업전문대학의 교내연구비지원에 의하여 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Miller J. A. and Bowman C. T. "Mechanism and Modeling of Nitrogen Chemistry in Combustion", Pro. Energy Combustion and Science, Vol.15, pp.23, (1989)
- [2] Driscoll J. F. et al. "Nitric Oxides Levels of Turbulent Jet Diffusion Flame : Effect of Residence Time and Damkohle Number", Combustion and Flame, Vol.88, pp.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, Vol. 23, pp. 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] 한국 산업 규격, "가스 온수 보일러 (KS B 8109)", (1998)
- [8] Fristron R. M. and Westenberg A. A., "Flame Structure", McGraw-Hill, pp.177-203, (1965)
- [9] 환경마크 협회, "환경마크 대상 제품 및 부여기준" ((25) 가스 보일러)", (1999)