

산업용 보일러 연료전환에 따른 효율 향상 적용사례

유현석, 이현찬, 이중성
한국가스공사 연구개발원 이용기기연구실

산 업용 보일러에 대해 오일버너에서 가스버너로 설비교체를 하면서 폐열회수, 저공기비 운전 등을 통해 열효율이 6~8% 정도 향상되었으며 fuel NO의 제거로 질소산화물질은 1/3정도 배출되었다. 지구온난화 물질인 이산화탄소의 배출도 에너지 절감을 통해 6~8% 정도 절감되었다. 이러한 결과는 국내 산업용 보일러의 효율향상 및 성능개선에 대한 분석적인 적용사례로 활용되어 연료전환을 통한 청정에너지 사용의 촉매역할을 하리라 기대된다.

1. 서론

Table 1 가스연소와 증유연소의 특성

국가에너지원을 전량 수입에 의존하고 있는 실정에서 무역수지를 개선하기 위해서 최근 정부에서는 에너지절약을 통한 무역수지 개선에 노력을 기하고 있는 실정이며, 1997년 채택된 교토의정서의 지구온난화물질 배출규제는 앞으로 산업전반에 저급연료를 사용하고 있는 국내의 경우 심각하게 대두될 것이며 이를 위해서는 고효율 시스템 개발 및 적용이 필연적이다.

국내의 경우, 산업용 수요의 대부분은 아직 저급연료인 B/C유를 사용하고 있으며 이러한 저급 연료를 고효율의 청정연료로 대체하고 시스템을 최적화하면 연료절감을 통해 무역수지 개선과 환경문제에 적절히 대응할 수 있다.

Table 1은 가스연료와 액체연료의 연소특성을 비교한 것이다.

		가스연소	증유연소	
연소제어범위(TDR)		1.7~10	1.3~5	
운전공기비(실제운전부하)		1.1~1.2	1.2~1.6	
로내 분위기 및 화염형상		산화성, 중성, 환원성 가능, 장·단·평면화염 가능	과잉공기가 많은 산화성, 비교적 긴 화염	
착화성		우수	양호	
연소실 부하		100~300만kcal/Nm ³ h	30~150만kcal/Nm ³ h	
공해물질	분진	없음	0.1~0.3g/Nm ³	
	SOx	없음	10~300ppm	
	NOx	일반연소	LPG 100~250ppm NG 100~180ppm	B/A 80~180ppm B/C 170~350ppm
		저 NOx 연소	LPG 35~60ppm NG 10~50ppm	B/A 60~90ppm B/C 140~200ppm
	Fuel NOx	없음	연료중 질소화합물 0.001~0.37%	
NOx 제어기술		우수	양호	

이러한 연료전환을 통한 시스템 효율상승과 환경문제개선에 대한 사례는 계속적으로 이루어져 왔으나 아직까지 연료전환 전후에 따른 효율개선과 환경오염배출물에 대한 구체적인 자료가 구축되어 있지 않아 활발한 연료전환을 통한 효율개선이 이루어지지 못하고 있다. 이에 산업용 천연가스의 연료대체 잠재량의 63%를 차지하는 산업용 보일러는 대체가능성이 매우 높은 설비이나 대상연료가 저급연료인 B/C유인 점을 감안하면 상용화된 열효율 향상방안인 이코노마이저, 과잉공기 저감 등을 통해 정확한 자료를 구축하고 제공하여 효과적인 연료전환이 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 산업용 보일러를 대상으로 연료전환 전·후 데이터를 비교 분석하여 공기에열기, 이코노마이저 등을 이용한 보일러의 효율향상 및 환경오염물질 기본데이터, 배가스량 저감을 등을 효과적으로 파악하여 연료전환 파급효과를 극대화하고자 하였다.

2. 보일러 효율증대 기술

보일러의 효율을 증대시키는 기술에는 보일러 본체에서 수관의 배열과 최적설계에 의한 효율 극대화가 있으나 본 과제에서는 기존 설치 보일러를 대상으로 했기 때문에 보일러 부가장치를 통한 효율증대 기술에 대해 알아보기로 하겠다.

2.1 급수예열기(economizer)

보일러의 효율을 증대시키는 방법 중 가장 대표적인 것으로, 보일러의 열손실 중에서 최대손실이 되는 것은 연도(smoke stack)가스에 의해서 방출되는 열량이다. 급수예열기는 이러한 연소배가스의 폐열(exhausted heat)을 회수하는 것으로 보일러의 급수를 예열하는 것이다. 부가적으로 보일러의 급수를 예열하면 일시경도를 감소시켜 스케일의 발생을 적게 하고 보일러 드럼 및 수관내의 물과 급수의 온도차를 감소시켜 동체에 일어나는 열응력을 경감시킬 수 있는 장점도 있다.

Fig. 1은 배가스 온도와 보일러 열효율과의 관계를 나타낸 것이다.

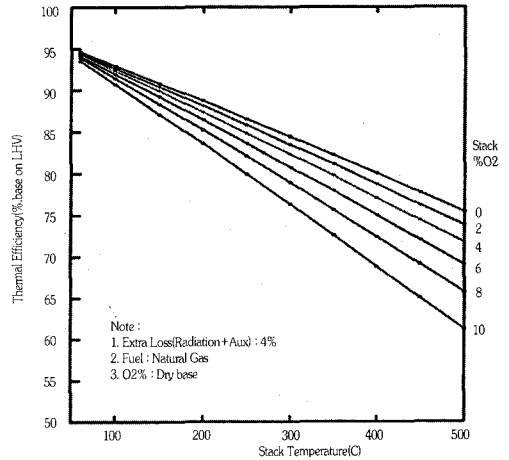


Fig. 1 배가스온도와 보일러 열효율과의 관계

그림에서 알 수 있듯이 과잉공기 2%일 때 배가스 온도가 25℃ 낮아짐에 따라 효율은 1%씩 증가된다. 보통 보일러 배가스 온도가 250~300℃ 정도 되므로 급수온도를 열교환시켜 100℃ 정도로 낮추게 되면 효율은 6~8%정도 향상된다.

이코노마이저는 배가스의 온도를 통상 100℃이하로 낮추기 때문에 황함유물을 포함한 연료에는 배가스 중의 SOx 발생으로 저온부터 사용할 수 없으며 천연가스와 같이 황성분이 없는 연료에만 적용이 가능하다.

배가스온도는 대부분 공정에서 일정하므로 급수온도에 따라 이코노마이저의 열교환면적이 결정되면 급수방식은 counter flow를 취하며 열교환기 하류에서 발생될 응축수에 의한 부식을 방지하기 위해 보통 SUS fin을 사용한다.

통풍저항이 증가하게 되나 이는 FD(forward) fan에 의해 충분히 보상될 수 있다.

보일러의 만수(滿水)시에 급수가 일시 중단될 경우, 이코노마이저의 과열에 의한 증기발생과 이로 인한 열교환기 손상 및 펌프의 cavitation을 방지하기 위해 급수조절장치의 최저흐름(minimum flow)과 급수탱크로의 bypass 설치를 고려해야 한다.

2.2 공기에열기(air preheater)

공기에열기는 급수예열기와 마찬가지로 배가스의 열을 회수하여 연소용 공기를 예열하는 방식으로 급수예열기와 비교해서 가스대 가스의 열교환 면적이 증가되어야 한다. இத점으로 연소용 공기를 예열하므로 연소효율을 증가시켜 과잉공기를 낮출 수 있어 배기가스 손실을 줄일 수 있다. 따라서 오일연료와 같이 불완전 연소와 황화합물(SOx)에 의한 저온부식이 문제가 되는 연료를 사용하는 보일러에 적용한다. 현재 오일버너 사용 보일러에는 공기에열기가 예외 없이 설치되어 있는 보편화된 기술이다.

Fig. 2는 중유연료에서 연소용 공기온도를 증가함에 따른 연료절감율을 나타낸 결과이다.

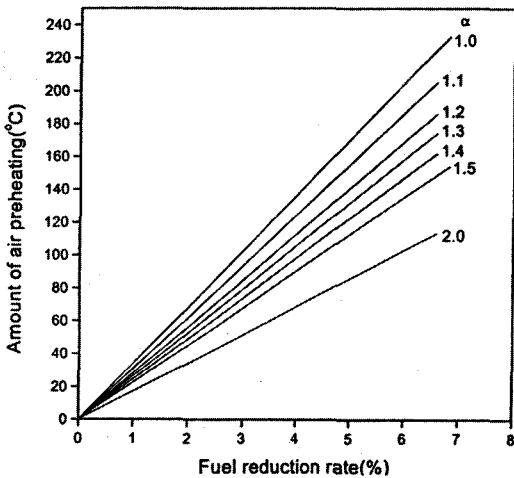


Fig. 2 연소용 공기온도 증가량에 따른 연료절감율(중유기준)

연소용 공기온도가 100°C 상승하면 1.5일 때 연료는 약 4.5% 정도 절감되는 것을 알 수 있다. 가스연료의 경우는 액체연료의 증발온도까지 필요한 현열이 필요없으므로 연소용공기온도상승량에 따른 연료절감율은 떨어지게 된다.

2.3 과잉공기비(excess air ratio)저감

연료와 공기가 이론공연비(stoichiometry air ratio) 조건으로 연소되면 실제상황에서는 이상조건(혼합, 단열 등)을 만족시

키기 어려우므로 불완전 연소가 될 수 있기 때문에 잉여의 공기를 공급하게 되며 과잉의 공기가 가지는 현열은 같은 열전달 시스템이라면 손실을 유발하므로 공기비를 낮출 필요가 있다.

가스상(gas phase) 연료를 사용하게 되면 공기와의 혼합특성이 우수해져 과잉공기비를 낮출 수 있다. Fig. 1에서 보았듯이 같은 배가스 온도일 경우 공기비가 낮아질수록 효율은 증가하는 것을 볼 수가 있다. 오일연소의 경우 TDR(tum down ratio)이 좁은 관계로 고부하(80%이상)운전시는 비교적 가스연료와 대등한 조건으로 운전이 가능하나 통상적으로 운전되는 부하(50%)에서는 공연비가 높게 운전된다.(a=1.4이상). 반면에 가스연소는 넓은 TDR 특성을 가지므로 오일연소에 비하여 공연비를 낮추어(a=1.2) 효율을 증대시킬 수 있다.

3. 연료전환 결과분석

기존 오일(중유)보일러를 대상으로 천연가스로의 연료전환 전,후 성능개선에 대한 신뢰성 있는 데이터를 얻기 위하여 Table 2에 나타나 있는 것처럼 다양한 업종의 업체를 선택하였으며 국내에서 사용이 가장 많은 노통 연관식과 수관식 보일러를 대상으로 하였다.

Table 2 산업용 보일러 연료전환 업체 및 개요

업체	업종	대상설비	적용기술
A사	제지	18T/H 수관보일러	이코노마이저, 공기에열기
B사	섬유	20 및 25T/H 수관보일러	이코노마이저
C사	금속	10 및 20T/H 수관보일러	공기에열기
D사	섬유	15T/H 노통연관보일러 2.5Gcal/H 열매보일러	이코노마이저

기존 사용 연료가 B/C였으므로 배가스 처리시설(ID fan, 집진기, 세정탑)은 철거하였으며 일부 업체는 기존에 사용하던 공기에열기를 그대로 사용하였다.

3.1 연소상태

Photo 1은 중유연료와 가스연료의 연소특성을 잘 나타내 주는 사진이다. 중유연료는 액상연료 특성으로 인해 연소초기에는 불완전연소로 인한 강한 황염을 나타냈으며 가스연료의 경우 청염을 나타내므로 복사전열에 있어 상당한 차이를 보 이리라 판단된다.

2차원 사진으로는 알 수 없지만 화염의 길이도 B/C 화염에 비하여 천연가스 화염이 짧아졌음을 알 수 있다.

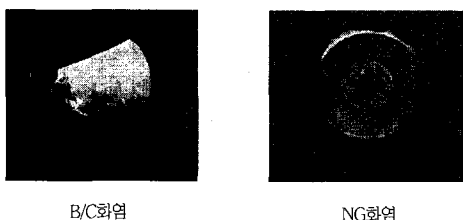


Photo 1 NG와 중유화염 가시화 비교

4개 업체에서 연료전환 전·후 측정된 부하율에 따른 배기 가스중 산소농도 변화가 Fig. 3에 나타나 있다.

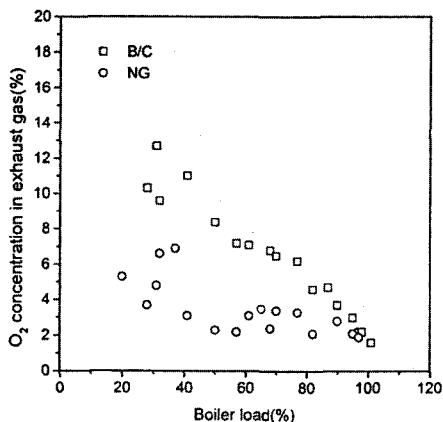


Fig. 3 보일러부하에 따른 산소농도 분포

B/C에 비하여 천연가스로 연료전환 후 산소농도가 평균 7%에서 2%로 약 5%가 감소하였다. 이는 배기가스량을 저감시켜 손실열을 줄일 수 있으며 FD(forward) fan의 전력도 약간이나마 줄일 수 있다는 결과이다. 부하율에 따른 과잉산소량

의 경향도 천연가스 버너는 중·고부하에서 일정한 반면에 오일버너는 부하율에 매우 종속적임을 알 수 있다. 이러한 경우 국내 보일러의 대부분 운전부하가 50%임을 감안하면 오일버너 사용으로 인한 손실은 비교적 큰 편이라 할 수 있다.

Fig. 4, 5는 C, D사의 연료전환 전·후 보일러 부하에 따른 배기가스 온도분포를 나타낸 결과이다. 이는 B/C화염에 비하여 천연가스 화염의 길이가 상대적으로 짧아져서 나타난 현상으로 판단되며 화염의 길이를 짧게 하여 로내 고온가스의 잔류 시간을 증가시켜 오히려 배기가스 출구온도가 낮추어지는 현상 때문이라 사료된다. 일반적으로 가스화염의 복사전열이 오일화염에 비하여 떨어지므로 오일보일러에서 버너만 교체하여 가스로 연료전환을 할 경우, 열전달 효율이 떨어진다는 통념은 가스화염의 형상조절이 상대적으로 자유롭다는 사실을 주지하지 못한 결과라 판단된다.

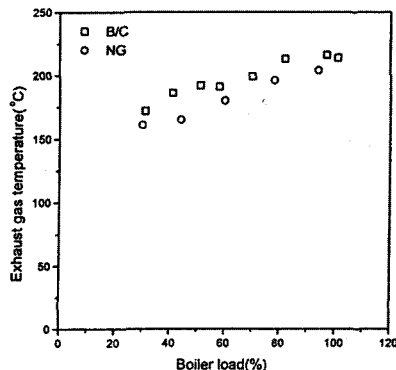


Fig. 4 보일러 부하에 따른 배기가스 온도 분포(노통연관식)

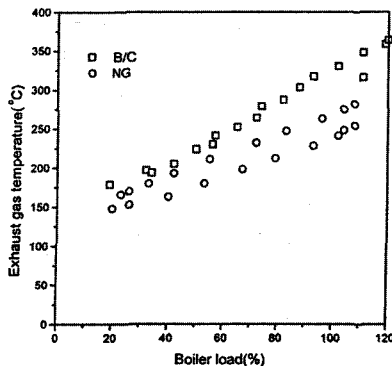


Fig. 5 보일러 부하에 따른 배기가스 온도 분포(수관식)

3.2 환경오염물질 배출특성

연료전환 전후에 따른 질소산화물중 대부분을 차지하는 NO에 대한 4개업체의 배출량을 배기가스온도에 대하여 Fig. 6에 나타내었다. 배출농도는 건가스기준, 산소 3%기준이며 이때 동시에 측정된 일산화탄소의 농도는 10ppm이하로 불완전연소에 의한 NO의 생성저감은 없는 것으로 판단하였다.

중유연료에 포함되어있는 질소성분으로 인해 중유화염에서 fuel NO의 생성이 포함되어 가스화염에 비하여 훨씬 높게 배출되는 경향을 나타냈다. 가스로 연료전환을 할 경우 버너온전조건(공연비)이 부하에 따라 변동이 없으므로 NO의 농도도 비교적 일정한 분포를 나타냈으나 오일연소의 경우 부하에 따라 공연비의 변화가 크므로 상대적으로 NO의 농도분포가 분산되는 것을 알 수가 있다.

Fig. 7은 가스버너에서 NO의 emission index(EI)를 나타내는 것으로 단위연료 당 배출되는 NO의 양을 나타내는 것이다.

보일러 용량에 따라 약간의 분산되는 결과를 나타냈으나 대략적으로 1.0~2.5g/Nm³으로 NO가 배출되는 것을 알 수가 있다. 연료전환 전 중유연소에 대한 결과는 EI 계산에 필요한 중유성분분석 결과가 부족하여 기재하지 못하였으나 미국 EPA에서 발표한 산업용 기준 중유의 질소산화물 배출기준이 6.8g/kg임을 감안하면 보일러에서 천연가스가 질소산화물을 배출에서는 중유에 비하여 상당한 우위에 있음을 알 수가 있다.

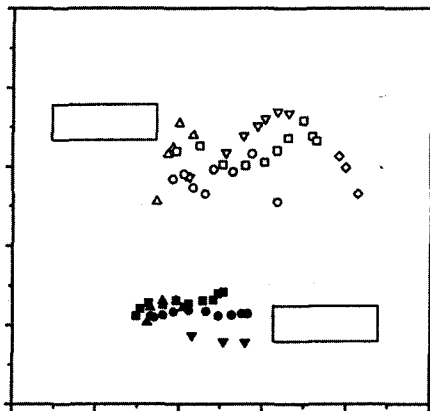


Fig. 6 배기가스온도에 따른 질소산화물 배출특성

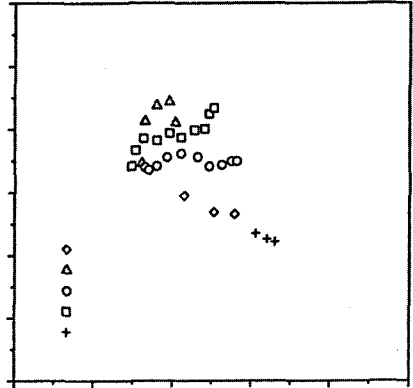


Fig. 7 연료전환 후 배기가스온도에 따른 단위연료당 질소산화물 배출특성

Fig. 8은 중유연소에서만 배출되는 황산화물에 대한 배출량을 배기가스 처리시설 전단에서 배기가스 온도에 따라 나타낸 결과이다. 결과에서도 알 수 있듯이 상당량이 배출되는 것을 알 수 있으며 이는 배기가스 처리시설에 대한 필요성을 나타내는 결과이면서 상대적으로 천연가스의 경우 연료성분 중에 황성분이 없으므로 이를 위한 처리시설이 필요없게 되는 것이다.

배출특성을 보면 배기가스 온도에 상당히 의존적인 것을 볼 수가 있는데 이는 오일버너가 부하에 따라 공연비가 크게 변하므로 화염온도차에 기인하는 것으로 판단되며 특히, 황산화 반응은 발열반응인 점을 감안한다면 이는 연료에 연결되어 있는 황분자가 분리되는데 필요한 에너지 때문이라 사료된다.

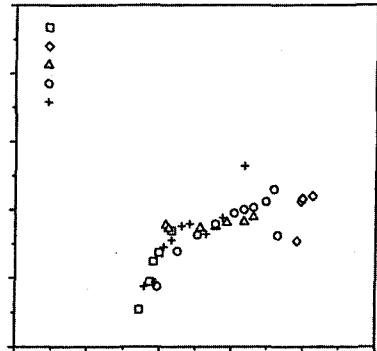


Fig. 8 배기가스온도에 따른 황산화물 배출특성

3.3 열효율

연료전환 전·후에 따른 보일러의 효율문제는 수요자, 공급자 모두에게 상당히 중요한 측면이다. Fig. 9는 B사의 연료전환 전·후 열정산 결과이다.

연료전환 후 이코노마이저를 통한 배기가스 열을 회수하여 효율이 약 6% 증가하였으며 기타 손실열은 4~5%이며 다른 업체에 비하여 연료전환 전부터 보일러 유지·보수가 잘되고 있었음을 알 수 있었다. 이때 이코노마이저의 효율은 약 84%인 것으로 나타났다.

C, D사는 월별 운전데이터를 분석한 결과 기타 손실열이 10%를 초과하는 결과를 나타냈다. 이는 흡수열이나 손실열 계산시에 입력되는 급수유량, 가스온도 등이 계측장비의 노후화로 신뢰성이 떨어지는 것으로 판단하여 열정산은 의미가 없을 것으로 사료되므로 열손실법에 의한 열효율 계산을 실시하였다. Table 3에 결과가 정리되어 있다.

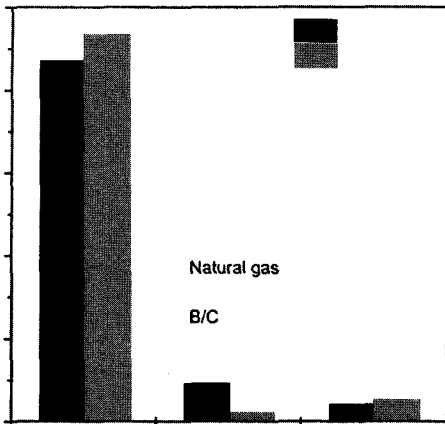


Fig. 9 연료전환 전후 열정산 비교(B사, 이코노마이저, eco. eff. 84%)

Table 3 연료전환 전·후 열효율 비교

업체	연료전환 후 설비구성	열효율(% , 열손실법)	
		B/C	Natural gas
C사	공기에열기	85	89
D사	이코노마이저 (eco. eff. 79%)	82	90

C사의 경우, 운전데이터 분석결과 약 4% 증가한 것으로 나타났다. 그러나 실제 업체의 연료사용량 감소효과는 매우 미비한 것으로 나타났으며 이는 월별 운전데이터에 대한 신뢰성이 떨어지는 것으로 사료된다.

D사의 경우, B사에 비하여 이코노마이저 전열효율이 79%로 약간 떨어지나 전체 시스템 열효율 증가는 약 8%가 되었으며 이는 연료절감으로 이어졌다.

4. 결론

- ▶ 중유연료에서 가스연료로 연료전환 한 결과 가스상 연료의 특성으로 인해 배기가스중 산소농도가 약 5% 정도 감소하였다.
- ▶ 연료전환 후 황산화물은 전혀 배출되지 않았으며 질소산화물의 경우 중유연료에 비하여 약 1/3 수준으로 감소하였다.
- ▶ 배기가스 배출온도는 보일러 출구에서 중유연료에 비하여 가스연료가 낮게 배출되었으므로 보일러에서 가스화염의 복사전열량 감소로 인한 효율저하는 문제시 되지는 않겠다.
- ▶ 연료전환 후 보일러 효율은 이코노마이저를 통한 폐열회수가 이루어져 6~8% 증가하였으며 이는 업체의 생산원가 절감을 이룩하였다. ◀