

분리형 열파이프를 이용한 보일러 연료가스 예열시스템 (A Thermosyphon Heat Exchanger for Fuel Gas Preheating of Boilers)

박 홍수*, 이 용국, 윤 경호(포항산업과학연구원 성에너지연구팀)
유 갑중(경북대학교 기계공학과)

요 약

보일러 연도 배기가스 현열을 회수하여 연료가스인 BFG를 예열하기 위한 분리형 열파이프 시스템을 개발하였다. BFG 예열 시스템의 열설계를 위한 전열모델을 수립하고 설계를 위한 프로그램을 작성하였으며 3,700KW급의 실규모 설비를 제작하여 현장적용 시험을 수행하였다. 개발시스템에 대한 실조업 성능평가를 행하여 보일러 운전에 미치는 영향, 시스템 자체의 성능 및 작동특성, 운전과 유지보수성에 대한 종합적인 검토를 수행하였으며 본 시스템의 적용을 통하여 보일러의 열효율이 평균 4% 향상되는 것으로 나타났다. 실조업 평가를 통하여 본 개발 시스템이 BFG의 예열을 위한 최적의 시스템인 것으로 판단되었다

1. 서 론

현재까지의 배열 이용은 거의 대부분이 기술적으로 비교적 화수가 용이한 400℃ 이상의 고온 배열을 대상으로 하여 연소용 공기의 예열, 공정용 증기의 생산 또는 고압 증기발전에 의한 전력 생산 등의 형태로 이루어져 왔으며 그 결과 현 단계에 있어서는 상대적으로 회수가 곤란하고 이용이 어려운 중저온 배열이 공정배열의 주체를 이루고 있다. 중저온배열이 그 양에 있어서 절대적인 우위를 차지하고 있음에도 불구하고 회수 및 이용이 어려운 이유는 온도레벨이 낮기 때문에 회수장치의 장대화가 불가피하며 전체공정의 온도레벨과 열량수급을 고려할 때 회수열의 이용이 어렵기 때문이다. 중저온 배열은 회수에너지의 이용에 있어서 제약을 받지 않는 전력으로 전환되어 이용되는 것이 일반적인 추세이나 회수에너지의 이용효율 측면이나 초기 투자비 측면에서 볼 때 열에너지를 형태로 자공정에 재이용되는 것이 바람직하다.

BFG는 열량이 낮기 때문에 타 열료가스에 비하여 예열에 따른 현열의 보유량이 많아 비교적 낮은 예열온도로 회수열의 재이용이 가능한 특징을 가지고 있다. 특히 발전보일러에서는 BFG를 주 연료로 사용하고 있기 때문에 연도 배기가스 현열을 회수하여 이를 120℃ 수준으로 예열할 경우 3% 내지 5%의 보일러 열효율 향상이 기대될 뿐만 아니라 약 1년 이내에 초기 투자비의 회수가 가능한 곳으로 판단된다.

본 연구에서는 분리형 열파이프식의 BFG 예열시스템을 자체 개발하고 실적용 시험을 수행함으로써 보일러의 열효율 향상과 더불어 제철공정 전반에 있어서 중저온 배열의 회수 이용을 위한 기술적 기반을 구축하고자 하였다.

2. 실험

2.1 시스템의 구성

전체 열교환 장치를 6개의 전열루프로 분할시키고 각 루프를 다음의 Fig.1과 같이 구성하였다. 증발기와 응축기의 전열관들은 상하부의 헤더와 연결이 되며 발생증기와 응축액은 이 헤더의 중심부분에 연결관을 설치하여 증발기와 응축기간에 이동이 되도록 하였다. 증발기와 응축기는 횡방향으로 각각 44개와 24개의 전열관이 3열로 하나의 헤더에 연결이 된다.

응축기에는 비응축성 가스 배출관과 안전밸브 그리고 내부 작동수의 레벨을 알 수 있도록 수면계를 설치 하였다. 비응축성가스 배출관은 응축기 하부헤더의 한쪽 끝 부분에서 상부 헤더를 관통하여 응축기 외부로 인출하였다. 이렇게 함으로서 비응축성가스를 증기의 유동을 이용하여 한곳으로 집적시켜 배출을 시킬 수 있다. 비응축성 가스는 열교환기가 작동중일 때 단순히 밸브를 일시적으로 개방함으로써 내부 압력에 의하여 배출이 가능하다.

안전밸브는 BFG가 공급되지 않아 응축기 측에서 열이 제거되지 않거나 BFG의 유량이 적은 상태에서 연도가스로 부터 열이 계속적으로 공급이 되어 내부압력이 증가될 때를 대비하여 설치된 것이다. 안전밸브는 보일러 운전시의 여러가지 상황에 대비하기 위하여 필수적으로 설치가 되어야 하며 이 안전밸브의 개방으로 내부 작동수의 배출이 이루어지면 열교환기의 작동이 중지된다. 본 시스템에서 안전밸브는 10kg/cm² 에서 개방이 되도록 하였으며 전열루프에 충전되는 작동수가 약 3분이내에 배출이 될 수 있도록 그 용량을 정하였다.

수면계로는 보일러용으로 사용되는 유리식 액면계를 선정하였으며 초충전시의 내부작동수의 수위를 파악하고 가동시 내부 유동상태를 추정하기 위하여 설치 하였다. 증발기 측에는 응축액이 유입되는 쪽에 전기히터와 작동수의 온도 및 내부압력을 파악할 수 있는 계측장치를 설치하였다. 전기히터는 동절기에 보일러가 정지할 경우 내부작동수에 의한 동파 방지가 주 목적이며 전열관의 온도저하에 따른 오염물질의 흡습현상을 방지하는 역

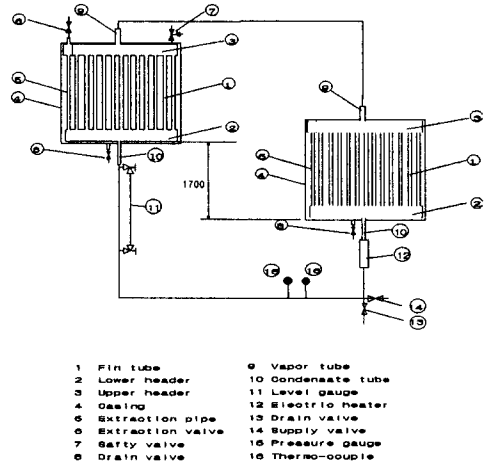


Fig.1 Detail of thermosyphon loop

본 연구에서는 분리형 열파이프식의 BFG 예열시스템을 자체 개발하고 실적용 시험을 수행함으로써 보일러의 열효율 향상과 더불어 제철공정 전반에 있어서 중저온 배열의 회수 이용을 위한 기술적 기반을 구축하고자 하였다.

2. 실험

2.1 시스템의 구성

전체 열교환 장치를 6개의 전열루프로 분할시키고 각 루프를 다음의 Fig.1과 같이 구성하였다. 증발기와 응축기의 전열관들은 상하부의 헤더와 연결이 되며 발생증기와 응축액은 이 헤더의 중심부분에 연결관을 설치하여 증발기와 응축기간에 이동이 되도록 하였다. 증발기와 응축기는 횡방향으로 각각 44개와 24개의 전열관이 3열로 하나의 헤더에 연결이 된다.

응축기에는 비응축성 가스 배출관과 안전밸브 그리고 내부 작동수의 레벨을 알 수 있도록 수면계를 설치 하였다. 비응축성가스 배출관은 응축기 하부헤더의 한쪽 끝 부분에서 상부 헤드를 관통하여 응축기 외부로 인출하였다. 이렇게 함으로서 비응축성가스를 증기의 유동을 이용하여 한곳으로 집적시켜 배출을 시킬 수 있다. 비응축성 가스는 열교환기가 작동중일 때 단순히 밸브를 일시적으로 개방함으로써 내부 압력에 의하여 배출이 가능하다.

안전밸브는 BFG가 공급되지 않아 응축기 측에서 열이 제거되지 않거나 BFG의 유량이 적은 상태에서 연도가스로 부터 열이 계속적으로 공급이 되어 내부압력이 증가될 때를 대비하여 설치된 것이다. 안전밸브는 보일러 운전시의 여러가지 상황에 대비하기 위하여 필수적으로 설치가 되어야 하며 이 안전밸브의 개방으로 내부 작동수의 배출이 이루어지면 열교환기의 작동이 중지된다. 본 시스템에서 안전밸브는 10kg/cm² 에서 개방이 되도록 하였으며 전열루프에 충전되는 작동수가 약 3분이내에 배출이 될 수 있도록 그 용량을 정하였다.

수면계로는 보일러용으로 사용되는 유리식 액면계를 선정하였으며 초충전시의 내부작동수의 수위를 파악하고 가동시 내부 유동상태를 추정하기 위하여 설치 하였다. 증발기 측에는 응축액이 유입되는 쪽에 전기히터와 작동수의 온도 및 내부압력을 파악할 수 있는 계측장치를 설치하였다. 전기히터는 동절기에 보일러가 정지할 경우 내부작동수에 의한 동파 방지가 주 목적이며 전열관의 온도저하에 따른 오염물질의 흡습현상을 방지하는 역

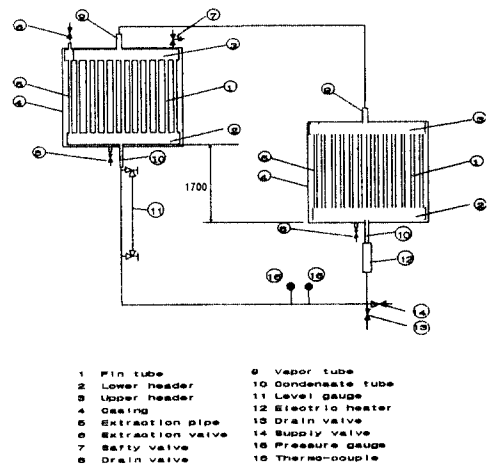


Fig.1 Detail of thermosyphon loop

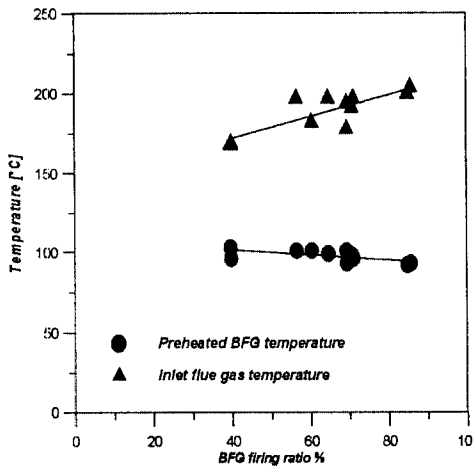


Fig.3 Effect of BFG firing ratios on temperature.

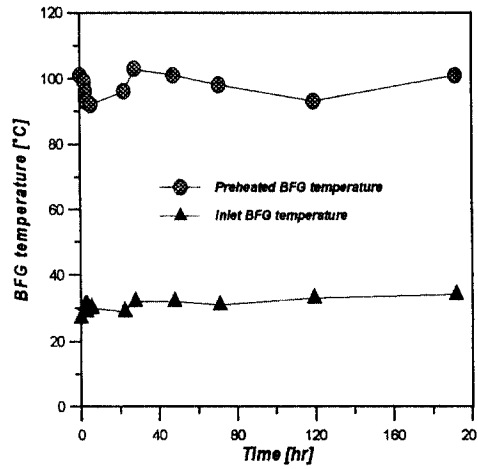


Fig.4 Effect of BFG preheating on temperature.

연소량을 100,000 Nm³/hr 까지로 하였다. BFG 연소량이 100,000Nm³/hr이 되면 투입열량에 근거한 혼소비율은 80%가 된다. 중유 연소량은 최대 2600 l/hr로서 중유 혼소비율이 26% 범위까지 측정을 행하였다. 성능평가시에는 전체 전열루프중 3개는 100% 가동 되도록 하였으며 나머지 3개는 약 30% 가동이 된다.

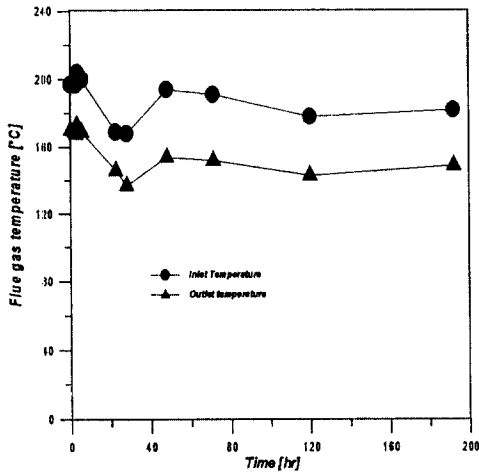


Fig.5 Inlet and outlet temperature of waste gas

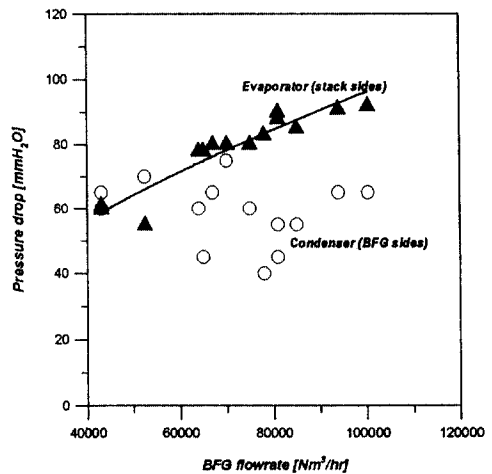


Fig.6 Effect of BFG flow rate on pressure drop

Fig.3에서는 BFG 혼소비율이 증가함에 따라 연도가스의 GAH 출구 온도가 증대되고 있는 반면 BFG 유량이 증가함으로써 예열온도는 오히려 감소됨을 알 수가 있다. Fig.4와 Fig.5는 BFG와 연도가스의 온도변화를 시간에 따라 나타낸 것으로서 이 기간내의 보일러 운전조건은 위에서 보인 바와 같다. BFG의 경우에는 전술한 바와 같이 예열온도의

변화가 10℃ 이내에 이루어지고 있음을 확인할 수 있다. 연도가스의 온도는 BFG 혼소율에 따라 큰 차이를 보여주고 있지만 열교환기 전후단에서의 온도차는 비슷한 수준을 유지하고 있다. Fig.6은 연도와 BFG 측 열교환기에서의 압력손실량을 나타내는 그래프이다. 연도측에서는 BFG 연소량에 따라 압력손실량이 증가되는 경향이 뚜렷하게 보여지는 반면 BFG 측은 경향을 파악하기 어렵게 보여지고 있다. BFG 측 열교환기는 2개의 덕트 사이에 놓여 있으며 상하부 덕트의 유량이 서로 다르기 때문에 열교환기 내부에는 유동의 편차가 있게 되고 이러한 결과로 BFG측 열교환기에서의 압력손실은 전체 BFG 유량과는 상관관계를 가지지 못하게 된 것이다. Fig.7과 Fig.8은 BFG 유량에 따른 댐퍼의 개도 변화를 보인 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 본 시스템의 설치로 BFG 측은 최대 60%, 연도 측은 최대 55% 까지 댐퍼가 개방이 되는 것으로 나타나고 있으며 이로서 본 시스템이 설치되더라도 보일러의 통풍조절과 BFG 공급에는 여유가 있음을 확인할 수 있다.

3.2 경제성평가

BFG 예열에 따른 에너지 절감효과는 BFG 현열증가에 따른 BFG 량 자체의 저감, 연료량이 감소함으로써 연소공기량이 줄어 들고 그에 따른

steam air heater 증기량의 감소 그리고 배기가스량의 감소에 의한 손실열의 저하로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 보일러에 대한 열수지식을 세워 연료 예열에 따른 에너지 절감효과 계산식을 도출하였으며 조업데이터를 적용하여 실제적인 절감량 산출이 가능하도록 하였다. 다음의 Fig.9는 열 수지식 수립을 위한 보일러의 대상범위를 나타낸 것이다. 그림에서 점선을 열수지 계산의 경계로 함으로써 배기가스량의 저하를 고려한 BFG 예열 효과를 도출할 수 있다.

Fig.10은 BFG 예열온도에 따른 BFG 절감율을 나타낸 것으로서 예열온도가 120℃ 일 때 BFG유량은 비예열시 투입유량의 5% 정도를 절감할 수 있는 것으로 나타나고 있다.

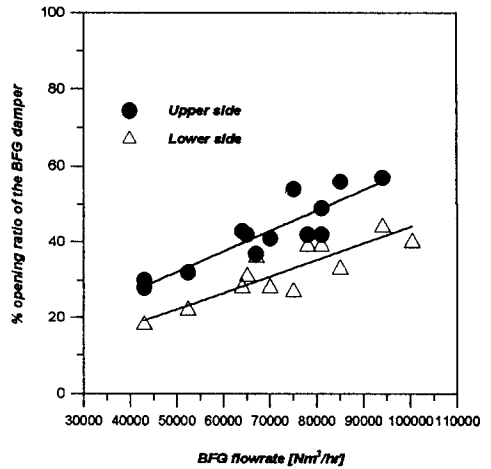


Fig.7 Effect of BFG flow rate on opening ratios of the BFG damper

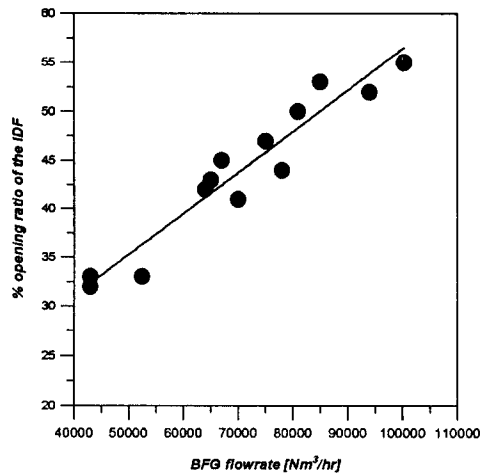


Fig.8 Effect of BFG flow rate on opening of the IDF

Fig.11은 예열온도에 따른 실제적인 절감량을 나타낸 것으로 BFG의 연소량에 따라서 절감량은 달라지게 되며 따라서 용량이 큰 보일러에서는 예열에 따른 효과가 증대된다. 설계조건인 BFG 유량이 90,000Nm³/hr이고 예열온도가 120℃ 일 때의 절감량은 5,000Nm³/hr에 달한다. Fig.12는 BFG 예열온도와 유량에 따른 보일러의 효율증가를 나타낸 것이며 설계조건에서 보일러의 효율은 4% 증대되는 것으로 나타나고 있다. Fig.13에는 계산을 위한 연도가스의 비열을 나타내었다.

Fig.14는 BFG 예열시스템 설치전과 설치후의 총 투입열량을 비교해 나타낸 것이다. 그림에는 연소조건의 변화를 보여주기 위하여 중유연소량을 같이 나타내었다. 보일러는 중유연소량에 따라서 효율이 달라지고 따라서 총 투입열량이 변화되므로 예열시스템의 설치효과를 파악하기 위해서는 동일한 연소조건에서 비교를 하여야 한다. 그림에서 볼 수 있듯이 중유연소량이 비슷한 조건에서 총 투입열량은 예열시스템 설치전 대비 약 5%정도 감소된 것으로 실측되고 있다.

다음에는 성능 평가시험에서 얻어진 실제의 조업데이터를 적용하여 예열시스템의 설치에 따른 효과를 산출하였다. 예열온도에 따른 BFG 절감율과 노효율 상승효과는 Fig.12에서 구해지는 값보다 다소 낮은 것으로 나타나고 있는데 이는 보일러 운전시에 통상적으로 적용하는 BFG 발열량을 적용하였기 때문이다. 계산결과에 의하면 현재 104℃로 예열이 되는 상태에서는 연료원단위를 72.3Kcal/Kwh 저감시킬 수 있으며 125℃

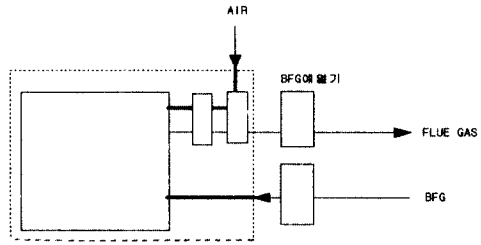


Fig.9 Heat balance of boiler

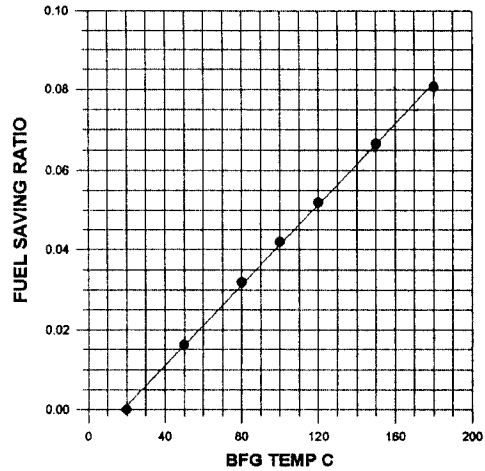


Fig.10 Effect of BFG temperature on fuel saving ratios

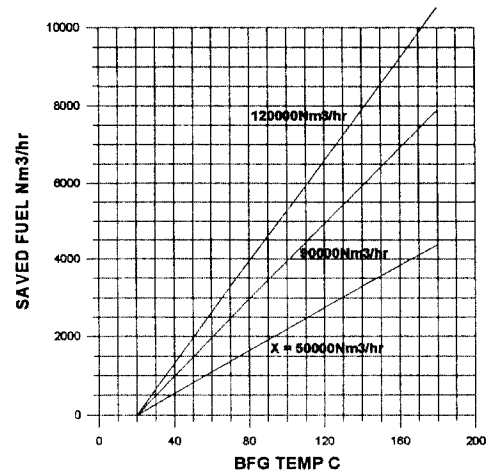


Fig.11 Effect of BFG temperature on saved fuel

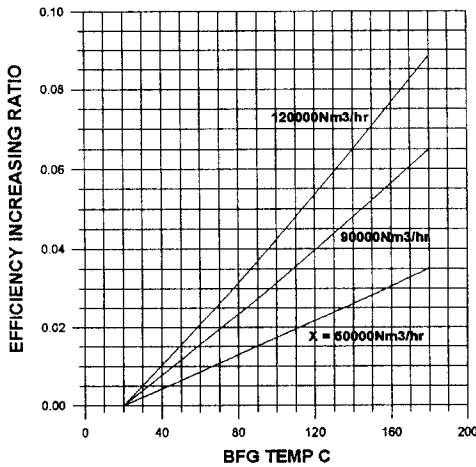


Fig.12 Effect of BFG temperature on saved fuel

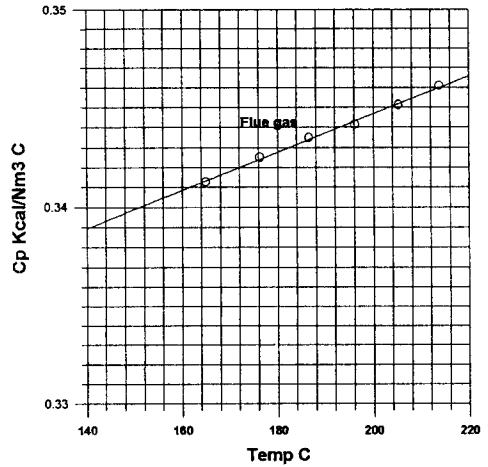


Fig.13 Effect of BFG temperature on efficiency increasing ratio

까지 예열할 경우에는 93.5 kcal/Kwh의 저감효과가 있는 것으로 나타나고 있다. 이를 근거로 연간 증유절감량을 계산해 보면 1942ton/yr ~ 2511ton/yr에 이르게 된다. 현재의 증유구입비를 리터당 160원으로 하게 되면 연간 에너지 사용량 절감액은 3.2억 원-4.1억 원 수준이 된다.

BFG 예열에 따른 연료절감효과는 연소량이 큰 설비일수록 커지게 되며 보일러의 용량에 따라서는 5%이상의 효율향상이 가능하다. 보일러의 용량이 증대되면 설비 투자비가 증가되지만 예열에 따른 효율과 회수 열량이 증대되어 지므로 오히려 투자비 회수기간은 단축된다. BFG 예열시스템에 대한 투자비 회수 기간은 1년미만이며, 본 예열시스템에 있어서는 약 0.6년이 되는 것으로 나타났다.

4. 결론

보일러 연도 배기가스 현열을 회수하여 연료가스인 BFG를 예열하기 위한 분리형 열파이프 시스템을 개발하였다. BFG 예열 시스템의 열설계를 위한 전열모델을 수립하고 설계를 위한 프로그램을 작성하였으며 3,700KW급의 실규모 설비를 제작하여 현장적용 시험을 수행하였다. 개발시스템에 대한 실조업 성능평가를 행하여 보일러 운전에 미치는

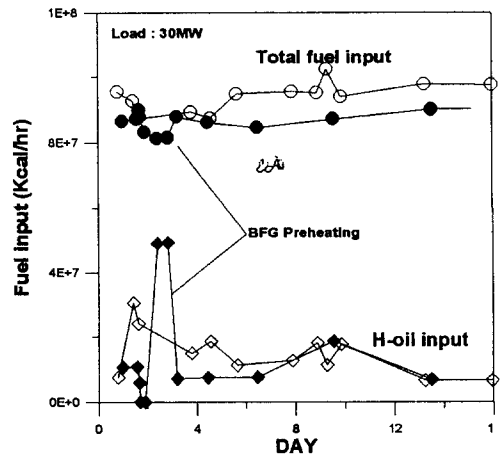


Fig.14 Comparison of heat

영향, 시스템 자체의 성능 및 작동특성, 운전과 유지보수성에 대한 종합적인 검토를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 시스템의 설치에 따른 BFG 공급계통 및 통풍 계통상의 문제와 보일러의 운전에 미치는 영향은 없다.
- 2) 보일러의 전 연소조건에서 BFG의 예열온도는 10℃ 이내에서 변화되는 것으로 나타나 안정적인 BFG 예열조업이 가능하다.
- 3) 개발시스템은 내부 작동유체 유동의 불안정이나 압력의 변동에 의한 진동현상 등이 없이 안정한 작동특성을 지니고 있다.
- 4) 전열관의 오염 및 부식상태, 내부 작동수와 시스템구성품과의 부식반응 등에 대한 확인을 통하여 개발 시스템이 장기운용에 있어서 문제가 없는 것으로 판단된다.
- 5) 본 시스템의 적용을 통하여 보일러의 열효율이 평균 4% 향상되는 것으로 나타났다.
- 6) 실조업 평가를 통하여 본 개발 시스템이 BFG의 예열을 위한 최적의 시스템인 것으로 판단되었다.

5. 참고문헌

1. I. Kohtaka, A. Yasuda, A. Mori and T. Mori : Development, design, and operation of large scale separate type heat pipes, 6th Int. Heat pipe conf., France, No. 3, 778-781(1987)
2. Koiche Oshima : Heat pipe research and development in Japan(II), The Institute of space and astronautic science ISAS report, No. 229, 1-16(1983)
3. R. Grief : Natural circulation loops, Journal of heat transfer, vol 100, 1243-1257(1988)