

아파트 가스보일러 배가스용 물유동층 열교환기 적용 연구

박상일, 김정근, 이후용*
한국에너지기술연구원 공업로연구팀, 첨단에너지(주)*

Demonstration Study on Water Fluidized Bed Heat Exchanger for Recovering Heat from Apartment Gas Boiler Flue Gas

Sang il Park, Jung Keun Kim, Hoo Yong Lee*
Korea Inst. of Energy Research, HighTech Energy co. Ltd.*

1. 서론

아파트단지, 목욕탕, 및 수영장등에서 사용하고 있는 보일러는 다량의 에너지를 소모하며, 이로 부터 배출되는 배가스에 의한 폐열의 발생량이 상당히 많다. 물유동층 열교환기는 배가스 유로에 다공판을 설치하고 다공판위에 물유동층을 형성하여 전열관군을 물유동층내에 위치시켰다. 이로서 전열면에서의 열전달율이 증대되고, 응축잠열을 효율적으로 회수할 수 있다. 그리고 전열면이 항상 젖은 상태를 유지하여 산성성분의 농축으로 인한 부식 가능성이 적다. 이의 연구 결과를 적용하기 위하여 대전 시내의 H 아파트의 가스보일러의 배가스로 부터 폐열을 회수하여 난방수를 예열하기 위한 물유동층 폐열회수용 열교환기를 설치하여 현장실증실험을 수행하였다.

2. 아파트 열교환기 실험장치

물유동층 열교환기의 현장실험을 위하여 대전시내의 1380세대의 H 아파트의 기관실에 설치된 도시가스를 연료로 사용하는 보일러에서 배출되는 배가스의 일부를 이용하여 폐열을 회수할 수 있는 물유동층 열교환기를 설치하였다. [그림.1]에는 H아파트의 물유동층 열교환기의 현장설치장면을 나타내었다.

대전 H 아파트의 난방시스템은 3개의 8 ton/hr 보일러를 중앙 기관실에 설치하였으며, 보일러에서 발생된 수증기는 난방수 스팀가열용 열교환기로 보내져서 각 세대에서 돌아오는 냉각된 난방수를 가열한 후 고온의 난방수를 난방수 펌프를 사용하여 각 세대로 다시 공급한다. 이러한 난방수 증기가열기로 유입되는 난방수의 일부를 물유동층 열교환기로 유입하고 물유동층 열교환기에서 승온된 난방수를 다시 스팀가열기의 입구부분에 연결된 배관을 통하여 스팀가열기로 보내어 보일러에서 발생된 증기로 좀 더 가열하도록 하였다. 따라서, 물유동층 열교환기를 사용하여 보일러 배가스로부터 회수한 폐열을 사용하여 난방수 가열기

로 공급되는 난방수를 예열하므로써 난방수 가열기에 사용되는 보일러의 수증기량은 줄여 보일러의 가스연료의 사용량을 줄일 수 있게 된다.

대전 H 아파트에 설치된 물유동층 열교환기는 설치면적을 줄이기 위하여 2층의 물유동층을 설치하였으며, 각 물유동층의 유로면적은 1,300 mm x 600 mm 로 하였고 전열관으로는 직경이 19mm인 열교환기용 스테인레스 강관을 사용하였다.

3. 현장실험결과

물유동층 열교환기의 아파트의 난방용 보일러에의 현장실증실험에서 난방용 보일러와 물유동층 열교환기를 작동하여 물유동층 열교환기에서의 배가스와 난방수의 입출구온도를 측정된 결과를 [그림.2]에 나타내었다. 그리고 [그림.2]에 나타난 물유동층 열교환기의 정상적인 운전상태를 나타내는 시간동안의 물유동층 열교환기에서의 배가스 및 난방수의 입출구온도의 측정 결과로부터 평균값을 계산하여 [표.1]에 나타내었다. [표.1]에서 보면, 물유동층의 배가스 출구온도는 상단과 하단에서 약 50 °C를 나타낸다. 따라서 보일러 배가스의 물유동층에서의 온도차가 약 130 °C 정도이므로 배가스의 현열만을 회수하여 나타나는 에너지절감율은 약 5 % 정도인 것을 알 수 있다. 또한 물출구온도가 약 40 °C 정도로 배가스 출구온도와 물출구온도의 온도차가 약 10 °C 정도로 그다지 크지않은 것으로 나타나, 물유동층의 열효율이 충분히 높다고 볼 수 있다.

[표.1] 실증실험용 물유동층 열교환기의 측정 결과

측정항목	평균값	측정항목	평균값
가스입구온도	182.4 °C	물입구온도	33.6 °C
상단가스출구온도	51.0 °C	물중간온도	37.1 °C
하단가스출구온도	49.2 °C	물출구온도	40.1 °C
압력손실	110 mmAq	물유량	13.7 LPS

2000년 8월부터 2001년 7월까지의 보일러의 운전일지를 작성하여 보일러의 월별 가스사용량을 구하였다. 그리고 보일러의 사용 목적을 난방과 급탕의 2가지로 나누어, 난방과 급탕시 사용한 가스소모량을 구별하여 계산하였다. 그러나, 난방과 급탕을 동시에 실시할 경우, 보일러 배가스로부터 열교환기를 사용하여 난방수를 예열할 수 있으므로, 이에 사용되는 가스소모량은 난방시의 가스소모량을 간주하여 계산하였다. [그림.3]에 월별 총가스사용량, 난방용 가스사용량 그리고 온수만 가열하여 급탕하는 경우의 가스소모량을 계산한 결과를 나타내었다.

이러한 보일러 운전자료를 분석하여 보면, 1년간 총가스용량은 1,266,000 m³ 이며, 이중에 난방시의 가스사용량은 1,042,000 m³ 으로 난방시 가스소모량의 전체 가스사용량의 비율을 계산하면 약 82.4% 정도가 된다.

따라서, 보일러의 배가스의 폐열을 이용하여 난방수만을 예열하더라도 전체 열량의 82% 이상을 회수할 수 있다고 볼 수 있다. 그리고 3대의 보일러의 가스소모율을 측정된 결과, 약 0.323 m³/sec 정도이었다. 따라서 항상 3대의 보일러를 동시에 가동하였다고 가정할 경우, 년평균 총 보일러 사용시간은 약 3.0 시간/일 정도이며, 난방을 실시한 평균시간은 약 2.5 시간/일 정도인 것으로 나타났다.

4. 현장실험결과 분석

아파트 물유동층 열교환기의 현장실증실험에서의 열교환기의 회수열량은 난방수의 입출구 온도차와 난방수의 유량을 측정하면 계산이 가능하다. 그러나, 좀 더 자세한 열교환기의 전 열성능을 분석하기 위하여 물유동층 성능 설계프로그램을 사용하여 배가스의 유량 및 잠열 회수량등을 계산하여 측정 결과와 비교할 수 있다.

아파트형 물유동층 열교환기의 성능분석에서 어려운 것은 물유동층을 통과하는 배가스유량을 직접 측정할 수 없다는 것이다.

물유동층 열교환기 설계 프로그램을 사용하여, 각 측정시간에서의 난방수의 입구, 중간, 그리고 출구온도와 난방수유량의 측정된 결과를 입력자료로 사용하여 배가스의 상단과 하단에서의 배가스의 출구온도를 계산하였다. 이러한 계산 과정에서 열교환기의 회수열량을 계산치와 측정치를 비교하면서 물유동층의 상단과 하단에서의 배가스 통과유량을 각각 구하였다. 그리고 이러한 계산 과정에서 잠열회수량과 에너지절감율등을 계산할 수 있다.

이러한 물유동층 열교환기의 성능예측의 정확성을 검토하기 위하여 난방수입구온도의 변화에 따른 상단과 하단의 물유동층에서의 배가스의 출구온도에 대한 계산결과와 측정결과를 비교하여 [그림.4]에 나타내었다. [그림.4]에서의 물유동층의 상단과 하단에서의 배가스의 출구온도의 실험결과와 계산결과를 보면, 온도차가 대개 약 3 °C 이내로 물유동층의 성능을 비교적 정확하게 이론적으로 계산할 수 있으며, 또한 물유동층의 배가스 통과유량도 비교적 정확하게 계산할 수 있음을 알 수 있다.

이러한 계산 결과로 얻은 전체 물유동층 열교환기와 상단과 하단의 물유동층을 통과하는 배가스유량을 [그림.5]에 나타내었다. [그림.5]에서 보면, 배가스유량은 시간에 따라 약간씩 감소하는 것으로 나타나며, 이러한 경향은 상단과 하단의 물유동층의 경우도 비록 더 불규칙하게 나타나지만 동일한 경향을 갖는 것을 볼 수 있다. 이것은 역시 시간이 경과하면서 물유동층 출구의 배가스온도가 높아져서 송풍기에서의 배가스온도가 상승하여 송풍량이 감소하기 때문인 것으로 보인다.

그리고 물유동층 열교환기의 현장실증실험에서 성능실험 시간동안 물유동층 열교환기에서 배출되는 응축수의 유량을 측정하였다. 이것은 일정시간 동안에 용기에 받은 응축수의 무게를 측정하여 응축수의 순간유량을 계산하였다. 이러한 응축수의 유량은 난방수의 입구온도, 배가스의 입구온도, 그리고 배가스 통과유량에 따라 변하나, 대개 난방수의 입구온도의 영향을 많이 받는다. 따라서 [그림.6]에 난방수 입구온도에 따른 응축수의 발생량의 측정결

과와 이론적 계산결과를 비교하여 나타내었다. [그림.6]에서 보면, 응축수의 계산결과는 비교적 일정한 변화 경향을 나타낸다. 그러나, 응축수유량 측정결과는 처음에는 작게 나타나나 중간정도에 이르면 측정값보다 오히려 크게 나타나고 이후에는 점점 차이가 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 경향의 차이에도 불구하고 전체적인 응축수유량에 대한 계산결과는 비교적 정확한 것으로 볼 수 있다. 이러한 경향의 차이는 물유동층 열교환기의 성능의 예측의 부정확성에 의한 것이 아니고, 시간에 따른 정확한 응축수의 순간유량의 측정이 어렵기 때문인 것으로 볼 수 있다.

물유동층 열교환기의 설계프로그램을 사용한 열교환기 성능분석 결과, 시간에 따른 전체 열량과 잠열회수량의 변화를 [그림.7]에 비교하여 나타내었다. [그림.7]에서 전체 회수열량은 난방수온도와 유량으로부터 직접 구할 수 있으며, 잠열회수열량은 응축수의 발생량과 수증기의 잠열에 의하여 결정될 수 있다. 따라서 [그림.6]에서 잠열량의 측정결과와 해석결과를 간접적으로 비교할 수 있으며, 이로서 잠열회수량의 정확성을 판단할 수 있다.

[그림.7]에서 보면, 전체회수열량은 초기에 약 450 kW 정도이며 이후 점점 줄어들어 약 300 kW 까지 감소한다. 물유동층 열교환기 성능실험에서 보면, 시간이 경과할수록 난방수의 입구온도가 증가하며, 배가스의 입구온도는 증가하고 물유동층의 배가스 통과유량이 감소하는 것으로 나타났다. 그러나, 시간이 경과하면서 열교환기 회수열량이 감소하는 원인은 주로 난방수의 입구온도가 증가하기 때문인 것으로 볼 수 있다.

그리고 물유동층 열교환기에서의 잠열회수량은 초기에 약 270 kW 정도이며 시간이 경과하면서 약 100 kW 까지 감소한다. 이것은 물유동층을 통과하는 배가스의 온도가 증가하면서 배가스의 포화수분량이 증가하여 물유동층에서의 배가스내의 수증기의 응축량이 감소하기 때문인 것으로 볼 수 있다.

3대의 8 ton/hr 용량의 보일러에서 발생하는 연소 배가스중의 일부가 물유동층 열교환기로 유입되어 배가스내의 폐열을 회수하게 된다. 물유동층 열교환기의 성능분석에서는 물유동층으로 유입되는 배가스량을 발생시키는 보일러의 용량을 가정하였으며, 이러한 보일러의 열발생량에 대한 물유동층 열교환기의 회수열량의 비율을 물유동층 열교환기의 에너지절감율로 정의하였다.

물유동층 열교환기의 현장실험에서의 측정자료를 사용한 열교환기 성능분석을 통하여 계산한 물유동층 열교환기의 시간에 따른 에너지절감율의 변화를 [그림.8]에 나타내었다. 그리고 이러한 계산에서 도출한 상단과 하단의 물유동층에서의 에너지회수에 의한 에너지절감율의 변화도 같이 나타내었다. [그림.8]에서 보면, 물유동층 열교환기의 에너지절감율은 초기에 약 10%에서 시작하여 시간이 경과하면서 감소하여 약 7.5% 까지 감소한다. 그리고 하단과 상단의 물유동층 열교환기의 에너지절감율은 시간에 따라 약간 불규칙하게 나타나나 대체로 하단의 물유동층 열교환기의 에너지절감율은 상단 물유동층의 에너지절감율보다 다소 높게 나타나는 것으로 나타났다.

물유동층 열교환기의 하부의 응축수 탱크에 pH meter를 설치하였으며, 이와 함께 pH 제어기를 설치하여 응축수의 pH를 제어할 수 있도록 하였다. 먼저 pH 제어장치를 사용하지

않는 경우의 응축수의 배출구에서 샘플을 채취하여 시간에 따른 응축수의 pH의 변화를 측정하였으며, pH 측정결과를 보면 초기에 응축수의 pH는 약 5.6 정도이었으며, 열교환기의 작동시간이 경과하면서 응축수 pH가 약 4.1 정도까지 내려가는 것으로 나타났다.

환경규제를 보면, 열교환기에서의 응축수의 pH의 허용치는 5.8 - 8.5 의 범위내로 규정되어 있다. 따라서 가스연료를 사용하는 보일러의 배가스의 폐열회수시에 발생하는 응축수는 그대로 방류할 수 없으며, pH 제어장치를 갖추어야 한다고 볼 수 있다. 본 연구의 경우, 여러 가지 실험결과 응축수에 일반 급수를 공급하여 희석하므로써 응축수의 pH를 허용기준 내로 유지할 수 있음을 알 수 있었다.

5. 성능평가 및 경제성 분석

[표.2]에 물유동층 열교환기의 전체 성능을 나타내는 여러 가지 항목의 평균값을 구하여 나타내었다.

[표.2] 아파트형 물유동층 열교환기의 전체 성능 요약

항목	계산결과	항목	계산결과
전체회수열량	368 kW	응축수 발생량	0.067 LPS
잠열회수열량	172 kW	건가스량	1.34 kg/s
잠열량 비율	46 %	에너지절감율	8.7 %

물유동층 열교환기의 성능실험 결과, 물유동층 열교환기의 전체 회수열량은 약 368kW 정도이며, 난방수 입구온도는 초기에 약 25 °C 정도이나, 시간이 경과하면서 약 40 °C 정도까지 증가한다. 그리고 열교환기 성능실험 동안의 평균 난방수 입구온도는 약 33.5 °C 정도로 나타났다. 난방수 평균출구온도는 약 40 °C 정도로 난방수의 승온량은 약 6.5 °C 정도가 된다.

물유동층 열교환기에서의 배가스내의 수증기의 응축으로 인한 잠열회수열량은 172 kW 정도로 전체 회수열량의 약 46% 정도로 나타났으며, 응축수의 발생량은 약 0.067 kg/sec 정도로 측정되었다. 그리고 물유동층 열교환기의 성능해석 프로그램으로 열교환기 성능측정 결과를 사용하여 계산한 열교환기를 통과하는 건가스량은 1.34 kg/sec 로 나타났다. 그리고 물유동층 열교환기의 에너지절감율은 약 8.7% 정도로 나타났다.

본 연구의 H아파트에 설치한 물유동층 열교환기의 성능 평가 결과를 요약하여 [표.3]에 나타내었다.

[표.3] 아파트형 물유동층 열교환기의 성능평가 결과

항목	계산결과	항목	계산결과
년간 LNG 사용량	1,407,000 m ³	보일러가동시간	3.15 시간/일
보일러 LNG 소모율	0.34 m ³ /sec	열교환기 회수열량	32만 kcal/hr
보일러 열발생량	1,163만 kcal/hr	년간 LNG 절감량	34,400 m ³
보일러 열효율	약 89%	LNG 가격	540 원/m ³
난방열량 비율	약 80%	년간 연료절감액	1,850만원
열교환기 통과 비율	약 31%	투자회수기간	약 3 년

H아파트의 2000년 1년 동안의 도시가스 사용량은 1,407,000 m³ 정도이며, 8 ton/hr 용량의 보일러 3대의 가스사용량을 측정한 결과 약 0.34 m³/sec 정도로 나타났다. 따라서 보일러의 일일 평균 가동시간은 약 3.15시간으로 나타났으며, 또한 보일러의 총 열발생량은 1,163만 kcal/hr 정도인 것으로 계산되었다. 그리고 전체 보일러의 발생 배가스량의 약 31% 정도를 열교환기에서 사용하였으며, 보일러의 열효율을 약 89%로 가정하였다. 또한 보일러에서 사용한 열량중에 약 80% 정도를 난방만을 위하여 또는 난방과 동시에 온수가열을 위하여 사용한 것으로 보일러 운전자료를 분석한 결과 나타났다. 따라서, 보일러의 배가스 폐열을 사용하여 난방수의 예열에만 사용하여도 대부분의 배가스 열량을 회수할 수 있으며, 실제로 열교환기의 출구온도가 약 50 °C 정도로 매우 낮은 상태로 배출되므로 더 이상의 폐열회수는 바람직하지 않은 것으로 볼 수 있다.

이러한 물유동층 열교환기 성능실험 결과, H아파트에 설치한 물유동층 열교환기를 사용한 연간 LNG 절감량은 34,400 m³ 정도로 나타났다. 따라서 이로 인한 연료절감액은 약 1,850만원 정도로 나타났으며, 물유동층 열교환기의 투자회수기간은 약 3년 정도인 것으로 평가되었다.

6. 결론

물유동층 열교환기의 현장실험을 통하여 가스연료를 사용하는 보일러의 배가스의 물유동층 폐열회수 시스템에 대한 성능을 분석하였으며, 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

물유동층 열교환기에서는 물층의 온도가 약 65 °C 이하로 제한되지만, 물유동층의 전열관에서의 총괄 열전달계수를 약 2,500 W/m²K 이상 유지할 수 있는 것으로 나타났다. 일반적인 열교환기의 경우의 총괄 열전달계수와 비교하면 상당한 전열증대 효과가 있는 것으로 볼 수 있다.

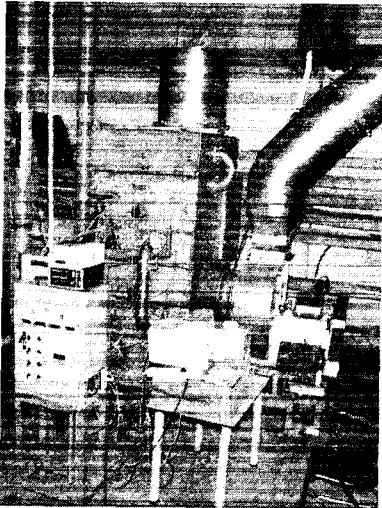
가스보일러의 배가스내의 산성성분에 의하여 배가스의 응축수의 pH는 약 4.1 정도인 것으로 나타났으며, 문헌에 의하면 pH의 변화 범위는 매우 큰 것으로 보고되었다. 따라서 일반적인 열교환기에서는 전열관 표면에 배가스의 산성성분의 응축과 건조가 반복되는 과정에서 산성성분이 농축되어 전열면 재질의 부식 가능성이 있는 것으로 보고되었다. 그러나, 물

유동층 열교환기의 경우, 전열관이 물유동층내에 위치하여 이러한 부식의 가능성이 줄어들 것으로 볼 수 있다.

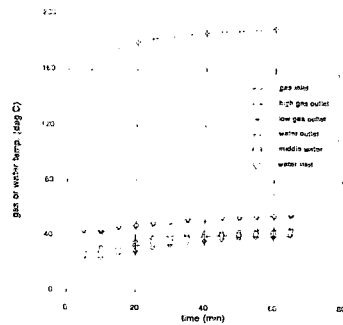
본 연구에서는 응축수의 pH 제어를 위하여 일반 급수를 공급하여 응축수를 회석하였으며, 물유동층 전체 시스템내의 응축수의 pH를 5.8 이상으로 유지하여 환경기준을 만족시킬 수 있었으며, 또한 물유동층에서의 전열관의 부식 가능성을 더욱 줄일 수 있게 되었다.

물유동층 열교환기를 통과하는 배가스를 기존의 배가스 덕트에서 유인송풍기로 흡입하여 폐열을 회수한 후 다시 기존 배가스 덕트의 하류로 공급함으로써, 물유동층 열교환기의 설치에 의한 기존 시스템에의 영향을 최소화하였다. 따라서, 보일러의 노내압의 증가를 줄이고, 연돌에 의한 통풍을 원활하도록 하였으며, 이로 인하여 기관실로의 배가스의 누출 가능성을 줄였다. 그리고, 물유동층 열교환기에 유인송풍기를 사용하여, 물유동층 열교환기의 전체 시스템에서의 배가스 압력을 대기압 이하로 유지할 수 있었으며, 이로 인하여 보일러 배가스의 누출 가능성을 줄일 수 있었다.

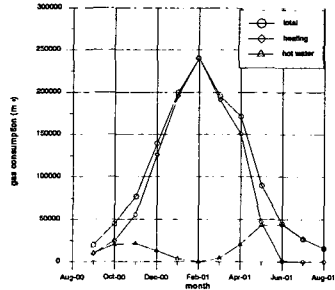
H아파트의 경우, 물유동층 열교환기의 회수열량은 약 368 kW 정도이었으며, 잠열회수열량은 전체 회수열량의 약 46% 정도인 것으로 나타났으며, 물유동층에서의 배가스의 출구온도는 약 50 °C 정도이었다. H아파트에서의 현장실증시험 결과를 분석한 결과, 물유동층 열교환기의 에너지절감율은 약 8.7% 정도인 것으로 나타났다. 그리고 이로 인한 연간 가스연료 절감액은 약 1,850만원 정도로 물유동층 열교환기의 투자회수기간은 약 3년 정도인 것으로 나타났다.



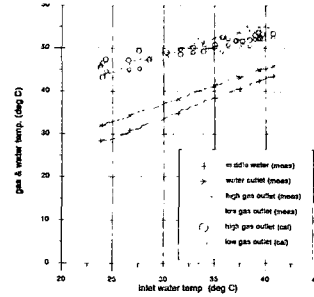
[그림.1] 물유동층 설치장면



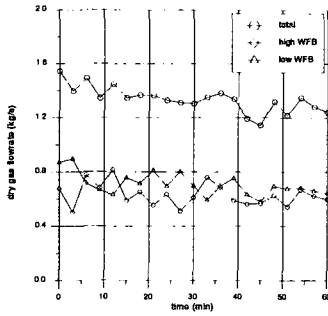
[그림.2] 배가스 및 난방수 입출구온도



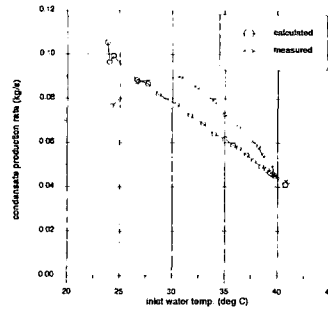
[그림.3] 월별가스연료 사용량



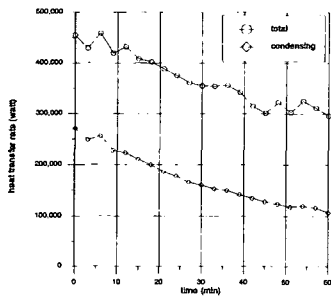
[그림.4] 물 및 가스온도의 비교



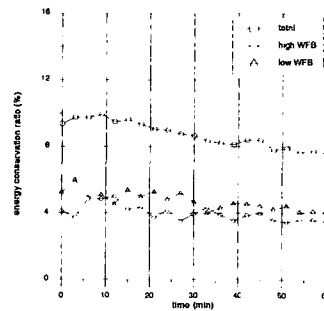
[그림.5] 가스유량의 변화



[그림.6] 응축수 발생량의 비교



[그림.7] 열교환기 회수열량



[그림.8] 에너지절감율 변화