

폐열회수 이용기술

1. 기술개요

각종 산업에서의 폐열은 폐가스, 폐공기, 폐온수, 폐증기들의 형태로 배출 폐기되고 있고, 주요 설비별 입열기준 폐열 배출규모는 각종 요로류의 경우 30~60%, 보일러의 경우 8~20%, 각종 건조설비의 경우 10~50%, 대형 공조 시설의 경우 30~50%로 배출되고 있다.

이러한 산업체의 다양한 폐열원의 특성에 따라 여러 가지 종류의 열회수장치를 이용한 열회수방안이 적용될 수 있다. 산업체에는 대개 연소배가스, 응축수 및 폐온수로부터 폐열을 회수하는 방안이 적용되고 있으며, 이러한 폐열회수방안은 현장조건에 따른 적용방안과 경제성의 분석기술이 요구된다. 열교환기는 이러한 폐열회수 장치의 가장 중요한 기기의 하나로 볼 수 있으며, 이러한 폐열회수 열교환기의 종류와 특성은 매우 다양하다. 여기서는 열교환기의 종류를 분류하고 각 열교환기의 형식에 따른 특성을 고찰하였다. 그리고 최근에 산업체의 부식성 저온 배가스의 열회수에 적용되고 있는 테프론 열교환기와 이에 따른 고려 사항을 검토하였다. 또한 가스보일러의 배가스 폐열회수방안으로 응축형 열교환기인 물유동층 열교환기의 적용 사례에 대하여 보다 상세하게 고찰하였다.

2. 폐열의 종류 및 폐열회수방안

산업체의 현장에는 다양한 폐열원이 존재한다. 이러한 다양한 폐열원으로부터의 폐열회수를 위하여 다음에 나타난 폐열회수 방안들이 사용될 수 있다.

- 연소 배가스로부터의 열회수
- 응축수로부터의 열회수
- 폐온수로부터의 열회수

그리고 <표 1>에 열발생 설비별 적용가능한 폐열회수장치의 종류와 형식을 나타내었다. <표 2>에 산업 폐열의 종류와 이에 적합한 폐열회수 방안을 나열하여 나타내었다.

<표 1> 열발생설비별 폐열회수방안 및 열교환장치

열발생설비및 폐열종류	열회수 방안	열교환기 형식 및 설비명
연소장치의 flue-gas 폐열	공기예열	관형 (중소형 보일러) 관형 (LNG 연소설비) 히트파이프형 (LNG 연소설비) 회전재생식 (발전용등 대형 보일러) 레큐퍼레이터 (요로류의 고온 배가스) 내식성 열교환기 (부식성 배가스 폐열회수)
	급수예열 (에코노마이저)	튜블러식 (탈기기가 있는 발전용등 대형 보일러) 핀튜브식 튜블러 (LNG등 clean 에너지 사용설비) 내식성 튜블러 (B-C등 저급연료 사용설비와 소각설비)
	폐열보일러	대형 소각설비, 요로류등 고온 배가스 배출설비
건조설비, 공조설비등 중저온 폐열	급배기 열교환 (공기예열)	관형 (고온 설비) 관형 (중저온, 고온설비) 히트파이프식 (중저온설비) 회전재생식 (중저온 설비) 내식성열교환기 / Glass tube식, 페놀수지 coating식, Teflon 소재 열교환기등 (중저온 설비)
	급수예열 (에코노마이저)	레디알 핀튜브식 (고온설비) sheet 핀튜브식 (중저온설비) 튜블러식 (Dust등 오염물질이 많은 경우) 내식성 열교환기 (부식성 배가스 폐열회수)
증류, 분리, 정제등 식품, 화학공정 폐열		관형 (Feed와 Product 열교환, 온수발생등) Shell & tube형 (Feed와 Product 열교환, 온수발생등) 흡수식 히트펌프 (공정 현열 및 잠열회수) 압축식 히트펌프 / TVR, MVR (공정현열과 잠열회수) *공정폐열로서 저압(저온)증기를 발생시켜 사용 가능한 압력(온도)까지 TVR 또는 MVR로서 증기를 압축하는 시스템

<표 2> 폐열의 종류 및 폐열회수 방안

폐열의 종류	설비명	배출 형태	회수 방안
배가스열	보일러,가열로, 소각로,직화식건조기	연소가스	폐열보일러, 연소용 공기예열, B.F.W 예열, 타설 비 직접이용 재순환,배가스량 감소 (공기비)
배공기열	건조기	공기+ 증발수분	흡입공기예열, 재순환, 배공기량 감소(습도조절)
응축수열	간접증기 사용설비	응축수	고온응축수 회수펌프, Feed예열, 재증발 증기열 회수(T.V.R,직접사용)
제품의 현열	전설비	고체,액체, 기체	Feed예열, 흡입공기예열, B.F.W 예열, 온수제조
탑정기체의 잠열	증류탑	혼합유체	폐열보일러, M.V.R, Heat Pump, Side Reboiler, B.F.W 예열
	증발관	증발수분	M.V.R, T.V.R, Feed예열, 온수제조, Heat Pump
	살균기	C.P.I 폐증기	온수제조
	반응기	용재(Solvent)	B.F.W예열, 온수제조
산화반응열	반응기	냉각수	증기발생, 온수제조, Feed예열

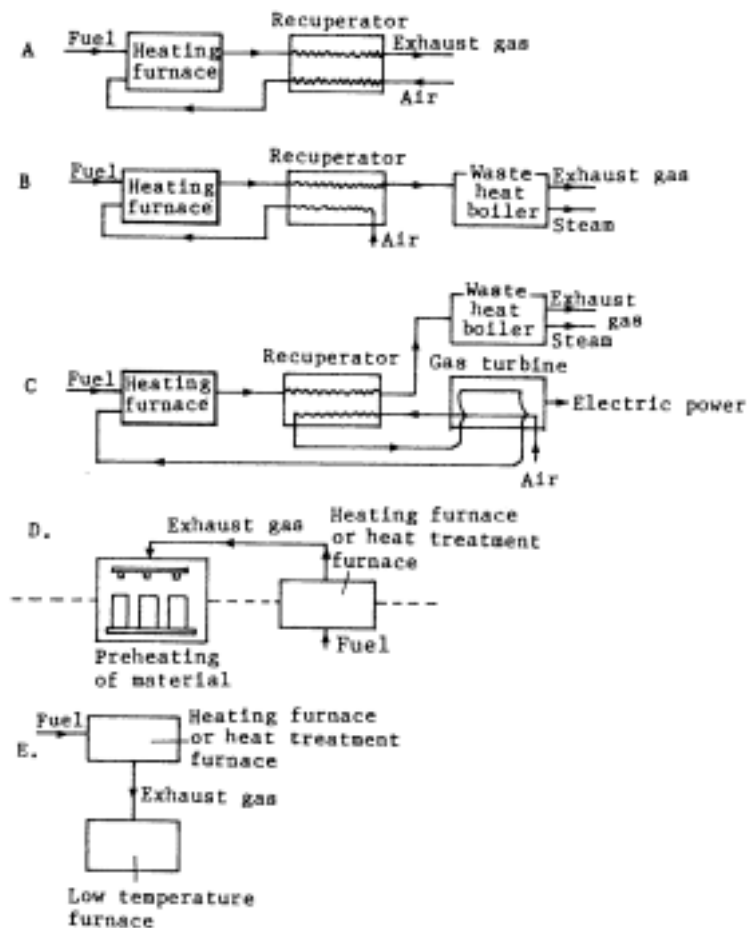
가. 연소 배가스로부터의 폐열회수

가열로등의 경우, 공기비, 노내압등을 적절하게 조절하더라도 상당한 폐열을 함유한 고온 배가스가 배출되므로 가열로의 열효율을 증대시키기 위하여 고온 배가스의 폐열을 회수할 필요가 있다. 이러한 경우의 일반적인 배가스 폐열회수 및 이용시스템의 구성을 [그림 1]에 나타내었다. 폐열회수는 모든 에너지절약 방안이 적용된 후에 고려하여야 하며, 폐열을 최소화하는 것이 매우 중요하다.

○ 사례 A와 D에서 회수열은 가열로에서 연소용공기 또는 예열에 사용된다.

○ 사례 B와 E에서 회수열은 폐열보일러에서 증기를 발생시켜 다른 장치에 사용되거나 다른 저온의 연소로에 사용된다.

○ 사례 C에서는 여러종류의 회수열가 혼합되어 사용되며 터빈에 의하여 회수된 폐열은 전력등을 생산한다.



[그림 1] 연소배가스 열회수방안

1) 원재료의 예열

원재료를 가열로에 투입되기 전에 배가스를 사용하여 예열하면, 가열로에서 원재료의 가열에 사용하는 연료가 절감된다. 원재료는 대개 상온이기 때문에 고온 배가스를 사용하지 않더라도 충분히 예열할 수 있다.

2) 연소용 공기 예열

오래 전부터 고온 배가스의 현열을 사용하여 연소용 공기를 예열하는 것은 증유보일러, 금속 가열로와 고온 가스 킬른 등에서 사용되어 왔다. 이러한 기술은 현재 콤팩트 보일러나, 콤팩트 공업로 등에서도 채택되고 있다. 공기에열기의 종류에는 금속재 레쿠페레이터, 세라믹 레쿠페레이터, 그리고 로타리 리제네레이터등이 사용되어 왔으며, 이외에도 히트파이프식 열교환기, 고온의 가스-가스 판형열교환기등이 사용되고 있다.

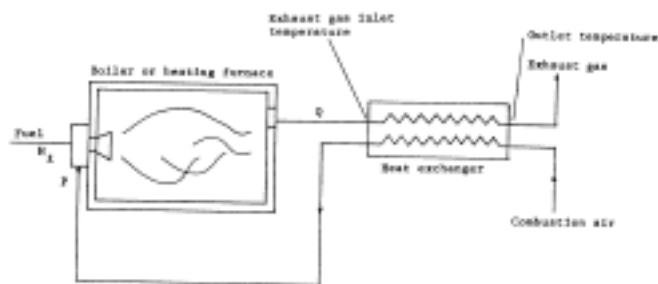
연소용 공기를 예열할 경우, 연소용 공기를 가열하기 위한 연료량 만큼 절약된다. [그림 2]와 같은 공기에열 장치에서 공기에열에 의한 연료절감율은 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$S = \frac{P}{H_1 - Q + P}$$

여기서 P : 연소공기 열량 (kcal/kg of fuel)

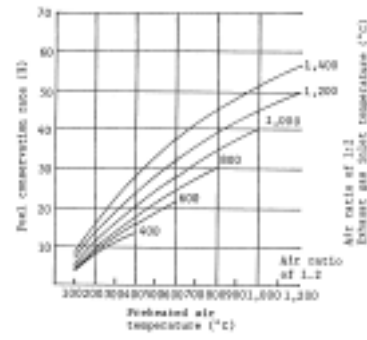
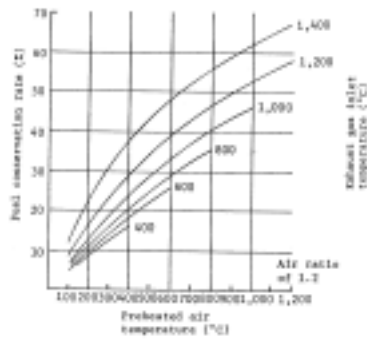
Q : 연소 배가스의 열량 (kcal/kg of fuel)

H₁ : 연료의 발열량 (kcal/kg)



[그림 2] 연소배가스를 이용한 공기에열시스템의 구성도

위의 식을 사용한 경우의 연료절감율의 계산 결과를 [그림 3]과 [그림 4]에 나타내었다. 공기의 예열에 의하여 공기의 부피가 증가하므로, 공기덕트의 크기와 송풍기의 변경이 검토되어야 한다. 그리고 고유황중유를 사용하는 보일러의 연소 배가스를 사용하는 경우, 분진이나 황산화합물에 의한 분진축적, 부식과 질소산화물의 증가등 문제점을 고려하여야 한다.



[그림 3] 공기에열에 의한 중유연료의 절감율 [그림 4] 공기에열에 의한 LNG 가스연료의 절감율

3) 폐열을 다른 공정의 열원으로 사용

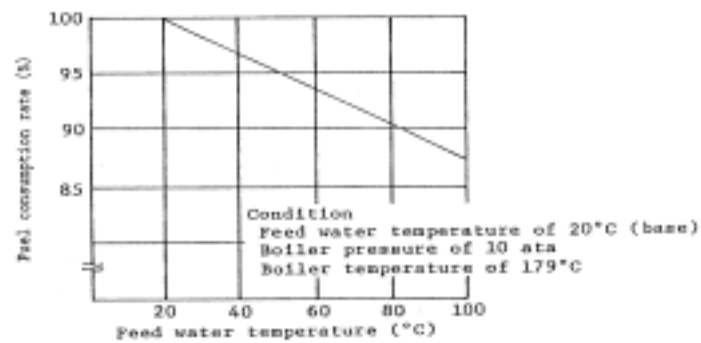
가열로의 경우, 열회수장치를 설치하여도 약 400~600 °C의 고온 배가스를 배출할 수 있다. 만약 많은 량의 수증기나 온수를 다른 공정에서 사용하는 경우, 폐열보일러를 설치하여 배가스의 현열을 이용하여 수증기나 온수를 생산할 수 있다. 만약 배가스의 현열이 다른 공정에서 필요한 열량, 온도범위 그리고 작업시간등을 고려하여 적정하면, 많은 량의 연료량이 절감된다. 한가지 사례로서, 급냉로에서 발생하는 배가스가 탬퍼링로의 열원으로 사용하며, 이 경우 탬퍼링로에서 사용하는 연료를 모두 대체할 수 있었다.

나. 응축수 열회수

스팀을 열원으로 가장 많이 사용되지만, 스팀의 유효 에너지사용율은 약 80% 정도이다. 나머지 열은 응축수와 함께 버려진다. 따라서, 응축수의 열을 100% 회수하여 사용하면, 약 20% 정도의 연료량을 절감할 수 있다. 회수된 응축수는 대개 보일러 급수로 사용된다. 응축수 회수의 효과를 다음에 나타내었다.

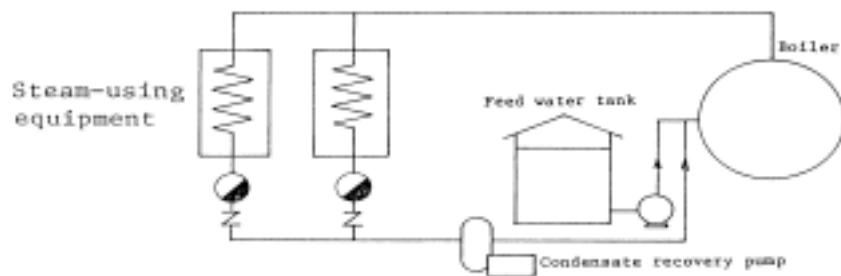
○ 보일러의 연료 사용량이 절감되며, 이에 따라 배가스의 배출량이 감소하여 배가스 오염배출량도 줄어든다. 응축수가 보일러 급수로 사용되면, 급수온도가 높아진다. 급수의 온도가 10°C 증가하면, 연료사용량이 1.5% 정도 감소된다. 이러한 급수의 예열에 의한 연료절감율의 변화를 [그림 5]에 나타내었다.

○ 회수된 응축수를 보일러의 급수로 사용할 경우, 회수된 응축수는 순수한 물이므로 수처리의 비용이 절감된다.



[그림 5] 보일러 급수예열에 의한 연료절감율

스팀트랩과 응축수회수 펌프를 사용하여 고온의 응축수를 회수하는 방법을 [그림 6]에 나타내었다. 이 경우, 응축수 회수배관은 밀폐되어 있고, 배출된 응축수의 모든 열량은 회수된다. 이러한 밀폐 배관을 사용한 응축수 회수방법이 최근에 사용되고 있다. 그러나 응축수 회수배관이 대기에 노출될 경우, 회수된 응축수의 온도는 100 °C보다 낮게 된다. 또한 100 °C 이상의 고압으로 압축된 응축수가 대기압으로 팽창될 때, 응축수의 일부가 스팀으로 변화된다. 이러한 플래쉬 스팀의 압력은 낮지만, 이러한 저압스팀을 유효하게 사용할 수 있는 공정들도 있다.

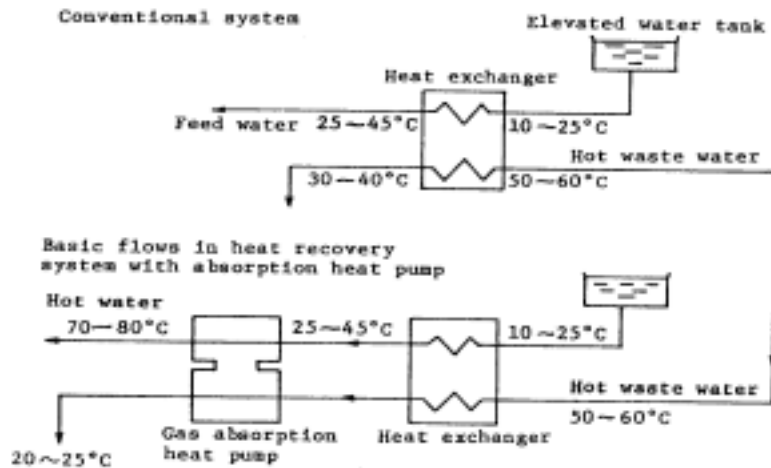


[그림 6] 응축수 폐열회수 방안

다. 폐온수로부터의 열회수

폐온수는 대개 간과되기 쉬운 형태의 에너지를 함유한다. 그러나, 많은 량의 에너지가 버려지고 있는 경우, 이러한 폐온수의 폐열을 회수하는 방안을 검토하여야 한다. 이러한 폐온수의 열을 회수하는 방안은 다음과 같다.

- 폐온수의 재활용
- 열교환기를 이용한 열회수 [그림 7]
- 히트펌프를 사용한 급수 가열 [그림 7]



[그림 7] 열교환기와 히트펌프를 이용한 폐온수열회수 방안

폐온수 재활용의 일반적인 방안은 응축기에서 간접접촉 형식으로 사용된 냉각수를 재활용하는 것이다. 이러한 폐온수는 비교적 깨끗하여 사무실 난방이나 목욕실에 공급되는 온수로 사용될 수 있다.

열교환기를 사용하여 폐온수의 에너지를 회수하는 경우, 폐온수내에 있는 불순물로 인하여 열교환기가 막히는 문제점을 있으나 판형 열교환기는 가격이 싸고 열교환기의 청소가 쉬운 장점이 있어서 염색공정이나 보일러에 사용된다. 여기서 폐온수와 깨끗한 급수를 열교환하여 공정에 사용하며 이러한 폐온수 열회수방안은 좋은 결과를 나타내었다.

히트펌프는 냉난방에 주로 사용된다. 그러나 최근 폐온수의 열을 회수하는 데도 사용되고 있다. 30~40 °C의 폐온수는 히트펌프를 사용하여 급수의 온도를 70~80 °C 정도로 승온하는 열회수시스템의 열원으로 사용된다. 히트펌프를 사용하는 경우 일반적인 열교환기만을 사용하는 열회수량에 비하여 약 50% 이상의 열회수량의 증대가 가능하다.

3. 폐열회수방안 분석

폐열을 회수 이용하는 시스템은 크게 나누어 공정자체에 이용하는 경우와 타공정의 보조 열원 또는 난방 등에 이용하는 경우로 생각할 수 있다. 공정자체에 이용하는 경우는 해당 공정(설비)의 열효율 제고로 나타나고 회수열의 손실은 없다. 그러나 회수열을 자체 이용하지 않는 경우는 열수요처의 가동조건에 따라 회수열을 효과적으로 이용하지 못하는 경우도 예상해야 한다. 경우에 따라서는, 폐열을 회수해도 이용할 대상이 없는 경우도 있을 수 있다.

가. 폐열회수 검토 사항

투자리스크를 최소화하고 기대효과를 극대화하기 위해서는 설비투자에 대한 타당성 검토가 필요하다. 설비(열교환기 등)의 형식, 용량 등을 최적화하기 위해서는 다음과 같은 사항이 사전에 측정 및 조사되어야 한다.

- 배출되는 폐열의 성분 분석 Data(열계산, 열교환기 소재 및 크리닝 장치 검토)
- 배출폐열의 유량과 온도 / 평균 및 최대값 (장치 용량 검토)
- 피가열유체의 유량과 온도 / 평균 및 최대값 (장치 용량 검토)
- 열교환기의 냉단온도 예측 / 2번째와 3번째 항에 의해 산출가능(Flue Gas 폐열의 경우 산부식 검토)
- 열교환기의 압력 손실 / 폐열유체 및 예열유체(기존설비에 미치는 영향검토 / Draft System, Pumping 시스템)
- 폐열원 설비의 성능 / 열정산 (기대효과 검토)
- 연간 연료 사용량 및 가동시간 (기대효과 검토)
- 에너지 구입 단가 (연료, 전력, 용수 등) (기대효과 검토)

폐열회수 투자에서 열교환기 형식 및 용량산정은 매우 중요하다. 열교환기의 형식이 이상적으로 선정되었다면 회수 용량은 가급적 크게 하는 것이 좋다. 즉 선정된 열교환기의 내구성과 연속사용 성능을 확신할 수 있다면 열교환기의 회수 용량은 설비의 내용 년수를 고려하여 투자 수익금(절약금액-투자금리 등 제비용) 즉, 회수율을 크게 계획하는 것이 바람직하다.

폐열회수 투자비 회수기간은 회수율(온도효율)과 부대비용에 따라 달라질 수 있다. 즉 부대비용(설치 공사비, Duct 및 Piping, 기타 보조설비비 등) 점유율이 크다면 회수율을 높게 산정하여도 투자회수 기간이 급상승하지는 않는다. 열교환기만의 투자비는 전열면적에 비례하고 전열면적은 회수율에 비례한다. 폐열회수시 상호유체의 열용량(MCp)이 유사한 경우의 적정회수율을 각 경우에 대하여 <표 3>에 나타내었다.

<표 3> 폐열의 종류에 따른 적정 열회수율

폐열의 종류	적정 열회수율
Flue Gas 폐열	40~60%
배공기 폐열	50~70%
폐온수 폐열	80~95%

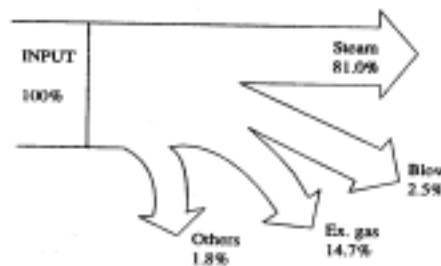
나. 보일러의 공기에열기와 절탄기에 의한 열회수 사례 분석

1) 기준 보일러의 열효율

보일러에 배가스의 열회수를 위하여 공기에열기와 절탄기를 설치한 경우의 열회수량과 보일러의 열효율 향상을 분석하였다. 먼저, 기준되는 보일러의 열평형을 계산하여 <표 4>에 나타내었다. 그리고 이러한 보일러의 열평형도를 [그림 8]에 나타내었다. 이러한 기준되는 보일러의 열회수장치를 설치하기 전의 보일러 열효율을 산출하는 계산 과정을 정리하여 <표 5>에 나타내었다.

<표 4> 기준 보일러의 열평형 분석 결과

열 량	열 량(kcal/h) x 10 ³	비 율(%)
입열량 연소열	7,805	100
출열량		
스팀발생열량	6,322	81.0
배가스손실열량	1,151	14.7
브로워수열량	194	2.5
다른 손실열량	138	1.8



[그림 8] 기준 보일러의 열평형도

<표 5> 기준 보일러의 열회수 전의 보일러 효율 계산

항 목	계산 결과
급수	
급수공급량	11.1 x 10 ³ kg/h
급수입구온도	20 °C
급수의 엔탈피	20.03 kcal/kg
발생 스팀	
스팀압력(게이지)	8 kg/cm ² G
스팀의 건도	98%
스팀발생량	11.1 x 10 ³ - 1.1 x 10 ³ = 10.0 x 10 ³ kg/h
포화급수의 엔탈피	176.67 kcal/kg
포화증기의 엔탈피	661.95 kcal/kg
발생스팀의 엔탈피	176.67 + (661.95-176.67) x 0.98 = 652.24 kcal/kg
스팀발생열량	10.0 x 10 ³ x 652.24 = 6,522.4 x 10 ³ kcal/h
브로워수	
브로우율	10%
브로우수량	11.1 x 10 ³ x 0.1 = 1.1 x 10 ³ kg/h
브로우수열량	1.1 x 10 ³ x 176.67 = 194.3 x 10 ³ kcal/h
연료	
연료의 저위발열량	10,400 kcal/kg
연료소모율	750.5 kg/h
입열량	10,400 x 750.5 = 7,805 x 10 ³ kcal/h
유효출열량	6,522.4 x 10 ³ - 10.0 x 10 ³ x 20.03 = 6,322 x 10 ³ kcal/h
보일러열효율	(6,322 x 10 ³ / 7,805 x 10 ³) x 100 = 81.0%

2) 공기에열기 및 절탄기의 열회수성능 분석

대개의 경우, 보일러에 공기에열기를 설치하는 얻는 보일러의 열효율의 향상은 약 5-6% 정도이다. 만약 공기에열기의 공기의 입출구온도가 각각 33 °C 와 120 °C 이고, 연료 1 kg당 공기유량이 15.09 kg 이라고 가정하면, 공기에열기에서의 회수열량은 $15.09 \times 0.32 \times (120-33) = 420.1 \text{ kcal/kg of fuel}$ 이다. 그리고 공기에열에 의한 보일러의 열효율의 증가율은 $(420.1/10,400) \times 100 = 4.0\%$ 이다. 그리고 대개의 보일러에서의 절탄기의 설치에 의한 보일러의 열효율의 증가는 약 3-5% 정도이다. 절탄기에서의 급수유량을 $11.1 \times 10^3 \text{ kg/h}$, 그리고 급수의 입출구온도를 20 °C 와 38.3 °C 로 가정하면, 절탄기에서의 회수열량은 $11.1 \times 10^3 \times 1.0 \times (38.3-20) = 203.1 \times 10^3 \text{ kcal/h}$ 이다. 그리고 절탄기에서의 열회수에 의한 보일러 열효율의 증가율은 $(203.1 \times 10^3) / (750.5 \times 10,400) \times 100 = 2.6\%$ 따라서 공기에열기와 절탄기를 동시에 설치한 경우의 보일러의 열효율은 다음과 같다. $81.0 + 4.0 + 2.6 = 90.3\%$

3) 열회수 방안 평가

공기에열기와 절탄기의 초기설치비를 50,000천원 및 60,000천원으로 가정하고, 연료의 가격을 320원/kg, 가동시간을 3,600시간/년으로 가정하면,

공기에열기의 연료절감액 = $750.5 \times 3,600 \times 0.04 \times 320 = 34,583 \text{ 천원/년}$

절탄기의 연료절감액 = $750.5 \times 3,600 \times 0.026 \times 320 = 22,479 \text{ 천원/년}$

공기에열기의 투자회수기간 = $50,000/34,583 = 1.4 \text{ 년}$

절탄기의 투자회수기간 = $60,000/22,479 = 2.7 \text{ 년}$ 이다.

이것을 다음의 <표 6>에 요약하여 나타내었다.

그리고 공기에열과 급수예열 이외의 보일러에서의 열효율 향상 방안은 다음과 같다.

- 연소 배가스의 산소농도를 조절, 부로우수의 열회수로 급수예열
- 보일러를 단열하여 보일러 표면온도 줄임
- 연료를 도시가스등으로 전환하여 수트브로워를 제거, 브로우수 비율을 줄임

<표 6> 보일러 열회수장치의 투자경제성

항 목	보일러효율향상(%)	초기설치비 (천원)	연료절감액 (천원)	투자회수기간 (년)
공기에열기	4.0	50,000	34,583	1.4
절탄기	2.6	60,000	22,479	2.7

4. 열교환기 전열이론

열교환기는 공정 유체를 가열하거나 냉각시키는 장치를 총칭하는 것으로 공장에서도 가장 널리 사용되는 장치중의 하나이다. 특히, 화공 관련 분야나 정유 계통에서 그 중요성이 더욱 크며, 에너지 절약 측면에서 공장 전체의 성능 평가에 영향을 주게 된다.

가. 열전달이론

열전달이란 온도가 높은 곳에서 온도가 낮은 곳으로 열이 전달되는 현상이며 열전달 현상은 그 특성에 따라 전도 열전달 (conductive heat transfer), 대류 열전달 (convective heat transfer), 복사 열전달 (radiative heat transfer)의 3가지로 분류할 수 있다. 실제에서는 이러한 세 현상들이 혼합하여 나타나고, 열 에너지의 전달에 따라 상변화 (phase change)가 일어나거나 물질 전달 (mass transfer)을 동반하는 등 해석하기에 어려움이 많다. 그러나 많은 실제적인 문제에서도 적절한 가정을 하여 이상화시키면 실용적으로 충분히 좋은 결과를 얻을 수 있다.

1) 전도 열전달

전도 열전달은 고체 또는 정지한 유체를 매개체로 하여 분자의 이동없이 분자에서 분자로 열전달되는 현상이다. 열전도에 의한 전열량은 다음과 같이 계산된다.

$$q = k (T_{\text{hot}} - T_{\text{col}}) / t$$

여기서 k 는 재료의 열전도도이며, t 은 재료의 두께이다. 일반적인 열교환기 재료의 열전도도를 <표 7>에 나타내었다.

<표 7> 일반적인 열교환기 재료의 열전도도

재 질	열전도도 (W/m K)
stainless steel	15
copper	390
aluminum	208
carbon steel	50
gases	0.02 - 0.3
liquids	0.03 - 0.7
polystyrene foam	0.03
pipe lagging	0.092

2) 대류 열전달

유체의 유동에 의해 열이 전달되는 것을 대류 열전달이라 하며, 이는 경계층

(boundary layer)을 통하여 열이 전달되며 대류에 의한 열전달량은 다음의 식으로 표시할 수 있다.

$$q = \frac{k}{\delta} (T_{\text{bulk}} - T_{\text{wall}})$$

여기서 δ 는 경계층 두께이나 이의 두께를 계산하기는 매우 힘들다. 이 때문에 일반적으로 k/δ 를 열전달계수 (heat transfer coefficient 또는 film coefficient), h 라고 정의한다.

$$q = h (T_{\text{bulk}} - T_{\text{wall}})$$

이러한 열전달계수는 $h = f$ (유동특성, 유체특성) = $f(\text{Re}, \text{Pr})$ 으로 표시할 수 있다. 그리고 일반적인 열전달계수는 <표 8>과 같다.

<표 8> 일반적인 열전달계수의 범위

유체종류	유체상태	열전달계수 (W/m ² K)
water	single phase	5,000 - 7,500
water	boiling < 5 bar	3,000 - 10,000
steam	condensing 1 bar	10,000 - 15,000
organic	single phase	750 - 1,500
organic	boiling 0.5 - 2.5 cp	1,000 - 3,500
organic	condensing 0.5 - 2.5 cp	1,500 - 4,000
gas	1 bar	80 - 125
gas	10 bar	250 - 400

3) 복사 열전달

복사 현상은 전도와 대류와 달리 중간의 매체없이 열전달이 발생하는 것이다. 모든 물질은 그 온도에 해당하는 파장을 발생시키며 이 파장에 의하여 열전달이 이루어진다. 복사 열전달에 의한 전열량의 일반적인 계산식은 다음과 같다.

$$q/A = \sigma \epsilon T^4$$

여기서 σ = Stephan's constant ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$), 그리고 ϵ 는 복사 전열면 재료의 방사율이다. 일반적으로 복사형 열교환기가 아닌 경우 열교환기를 설계할 때 복사에 의한 열전달은 고려하지 않고 계산한다.

나. 열교환기 성능계산

1) 총괄 열전달계수

광의의 열교환기의 정의는 열을 교환하는 기기의 총칭이나, 일반적으로 상업적으로 사용되는 열교환기라 함은 금속을 사이에 두고 두 유체 사이에 열전달이 되는 기기이

다. 이들 기기에서 열전달 현상은 보통 매체의 온도가 아주 높지 않아 복사에 대한 열전달량은 무시할 수 있어 전도와 대류에 의해 열전달된다고 할 수 있다. 이러한 경우의 열교환기의 미소 전열면적에 대한 열전달량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dQ}{dA} = U (T_{hot} - T_{cold})$$

이러한 미소 전열면적에 대한 전열 식을 열교환기 전체 면적에 대하여 적분하면, 다음과 같은 전체 열교환기에서의 전열량에 대한 식을 얻을 수 있다.

$$Q = UA \Delta T_{LM}$$

그리고 열교환기에서의 고온 유체와 저온 유체의 냉각열량 및 흡입열량은 모두 다음 형태의 식으로 표시할 수 있다.

$$Q = \dot{m} C_p (T_{in} - T_{out})$$

여기서 U의 값은 유체의 고유의 성질 뿐만 아니라 기기의 구조에 따른 유체의 유동 특성에 따라 차이가 나며, 열교환기의 성능 해석에 가장 중요한 인자가 된다. 열교환기의 성능을 향상시키기 위해서는 총괄 열전달계수를 크게 하여야 하며, 이는 유체의 유속을 빠르게 하여 설계한다.

이러한 총괄 열전달계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 전열 면이 깨끗한 경우,

$$\frac{1}{U_{clean}} = \frac{1}{h_{cold}} + \frac{t}{k} + \frac{1}{h_{hot}}$$

그리고 전열 면에 파울링이 있는 경우,

$$\frac{1}{U_{fouled}} = \frac{1}{h_{cold}} + R_{cold} + \frac{t}{k} + R_{hot} + \frac{1}{h_{hot}}$$

이다. 여기서 R_{cold} 와 R_{hot} 는 각각 저온측과 고온측의 전열 면에서의 파울링계수이다.

흔히 말하는 총괄 열전달계수는 3가지의 값이 사용되고 있다. 첫째는 전열면이 깨끗한 경우에 구한 값으로 clean 값이라 하고, 둘째는 fouling을 고려하여 계산한 값으로 calculated 값이라 하며, 마지막으로 기기의 안전율을 고려하여 열교환기의 크기를 결정하고 이의 최종 설계로부터 역으로 계산한 총괄 열전달계수를 service 값이라고 한다.

2) 대수평균온도차

온도차 또한 열교환기의 성능을 결정하는 데 중요하다. 이러한 온도차는 대수평균온도차 (LMTD, Logarithmic Mean Temperature Difference)를 사용한다. 대수평균온도차는 열교환기의 미소면적에서의 전열량을 전체 면적으로 적분하여 사용하기 때문이다. 예로 대수평균온도차는 열교환기의 구조 및 유체의 엔탈피 변화에 따라 다음의 식과 같이 나타난다.

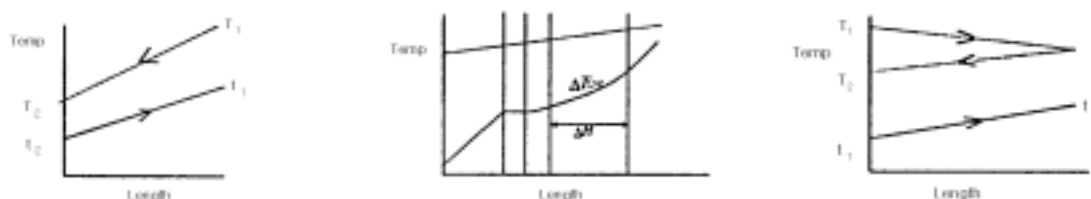
온도변화에 따른 엔탈피 변화가 일정할 경우 (단일상의 순수한 대향류인 경우),

$$\Delta T_{LM} = \frac{(T_{hi} - T_{co}) - (T_{ho} - T_{ci})}{\ln[(T_{hi} - T_{co}) / (T_{ho} - T_{ci})]}$$

그리고 온도 변화에 따른 엔탈피 변화가 곡선인 경우 (상변화 및 물성치의 변화),

$$\frac{1}{\Delta T_{LM}} = \frac{1}{\Delta H} \left[\frac{\Delta H_1}{\Delta T_{LM1}} + \frac{\Delta H_2}{\Delta T_{LM2}} + \dots \right],$$

그리고 두 유체의 방향이 대향류가 아닌 경우, $\Delta T = F_T \cdot \Delta T_{LM}$ 이다. 여기서 F_T 는 F factor 라고 하고, 이는 열교환기의 구조 및 입구와 출구에서의 온도에 따라 변하는 값이다. [그림 9]에 대수평균온도차를 구하는 각 경우의 온도분포곡선을 나타내었다.



[그림 9] 단일상의 대향류(a), 상변화의 대향류(b), 대향류가 아닌 경우(c)의 고온유체와 저온유체의 온도분포곡선

3) 파울링계수

열교환기를 오래 사용하는 경우, 열전달 면에 불순물의 층이 생긴다. 이 층을 fouling layer 라 하고, 이렇게 발생된 fouling layer에 의해 열전달 성능이 감소하며, 이러한 파울링에 의한 열저항의 증가율을 파울링계수로 표시한다. 열교환기의 성능해석 및 설계에서 많이 사용되는 파울링계수는 <표 9>와 같다.

<표 9> 일반적인 파울링 계수의 설계 값

유체종류	파울링계수 (m ² K/W)	유체종류	파울링계수 (m ² K/W)
sea water below 50 °C	0.0001	fuel oil	0.0008
treated cooling water < 50°C	0.0002	crude oil	0.0003-0.001
treated cooling water > 50°C	0.0003	refrigerant liquid	0.0002
untreated water	0.0005-0.0008	compressed air	0.0003
steam (oil free)	0.0001	natural gas	0.0002

5. 열교환기 종류 및 특성

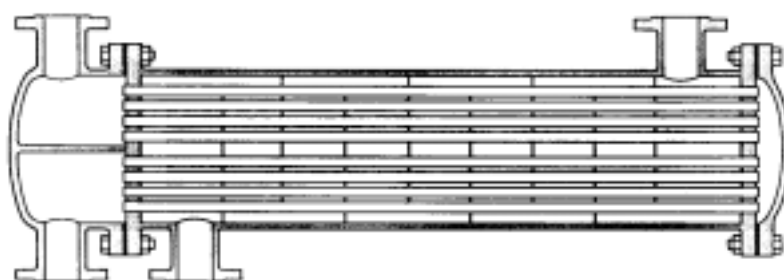
열교환기의 종류는 크게 레쿠퍼레이터와 리제네레이터의 2가지 종류로 나눌 수 있다. 그리고 전열재질의 유무에 따라서 간접접촉 방식과 직접접촉 방식으로 나눌 수 있다.

레쿠퍼레이터는 각 유체에 대하여 분리된 유로를 갖추고 있다. 여러 가지의 유체는 별도로 분리된 유로를 통하여 동시에 흐르고, 고온의 유체로부터 저온의 유체로 일정한 두께의 전열재를 통하여 전열된다. 그리고 리제네레이터식(재생식)은 비교적 열용량이 큰 고체 matrix를 통하여 유체가 통과하는 하나의 유로를 갖는다. 고온 유체와 저온 유체가 교대로 이러한 matrix를 통과한다. 고온유체가 통과할 경우 (hot blow라고 함), 고온 유체로부터 matrix로 전열된다. 그후에 저온 유체가 matrix를 통과할 경우 (cold blow라고 함), matrix로부터 저온 유체로 전열된다.

레쿠퍼레이터는 매우 다양한 형태로 나타나나, 크게 관형 열교환기와 판형 열교환기로 나눌 수 있다. 관형 열교환기는 주로 많이 사용되어져 왔으며, 많이 익숙해져 있다. 열교환기의 제작회사가 제공하는 표준 모델들은 비교적 저가이며, 사용범위가 넓다. 관형 열교환기는 이중관형 열교환기, shell & tube 열교환기(다관형 열교환기), 핀튜브 열교환기와 히트파이프 열교환기등으로 분류된다. 그리고 판형 열교환기는 일반적으로 판형 열교환기라고 불리는 plate-and-frame 열교환기, 스파이럴 열교환기, panel-coil 열교환기, plate-fin 열교환기등으로 나눌 수 있다.

가. Shell & tube 열교환기

Shell & tube 열교환기는 관형 열교환기의 대표적인 형식이다. 이러한 관형 열교환기는 다양한 재질을 사용하고 고압을 견딜 수 있는 정밀한 규격의 전열관을 쉽게 구입할 수 있기 때문에 가장 많이 사용된다. 실제로 사용압력과 온도에 거의 제한이 없다. 그리고 전열관을 취부하는 관관에 드릴을 사용하여 쉽게 연결 구멍을 가공할 수 있다. 이러한 제작의 용이성이 관형 열교환기의 사용의 증가를 가져 왔으며, 주요 열교환기 제작회사에서는 제작품의 표준을 마련하였다. 이러한 광범위한 관형 열교환기의 사용, 비교적 저렴한 제작비, 사용자의 익숙함, 그리고 오랜 동안의 만족할 만한 성능발휘등으로 인하여 새로운 열교환기를 설치할 경우에 관형 열교환기를 우선적으로 고려하게 되었다. 이러한 Shell & tube 열교환기의 구조를 [그림 10]에 나타내었다.



[그림 10] Shell & tube 열교환기의 구조

Shell & tube 열교환기는 액체/액체 열교환기, 액체/증기-응축 열교환기, 그리고 액체/증기-증발 열교환기로 주로 사용된다. 그리고 Shell & tube 열교환기는 가장 보편적인 열교환기로 폭넓은 범위의 열전달량을 얻을 수 있으므로 가장 많이 사용된다. 화학공정에서 새로 제작되는 열교환기의 약 85% 정도가 이 형태로 제작될 정도로 적용 범위가 넓다. 그리고 본 열교환기는 TEMA (Tubular Heat Exchanger Manufacturers Association)에 아주 세밀하게 규정되어 있어 열설계와 구조설계까지 제공하는 범용 설계 프로그램이 상용화되어 있다.

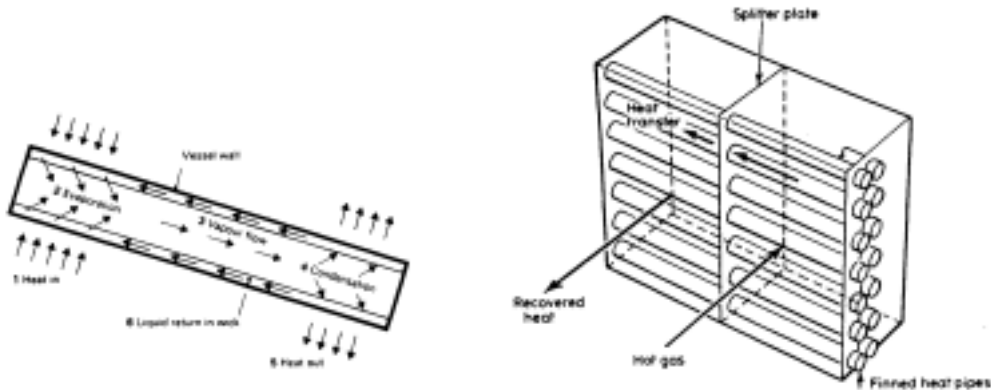
나. 히트파이프 열교환기

1) 히트파이프의 구조 및 작동 원리

히트파이프 열교환기는 [그림 11]과 같이 외부 형태는 Cooling Coil 이나 Heating coil 과 유사한 특징을 갖고 있다. 즉, 일반적인 Fin Tube 열교환기는 각 튜브가 Header 에 연결되어 증기 또는 냉수가 튜브 내부를 통과하도록 되어있으나 히트파이프식은 [그림 12]와 같은 Heat Pipe 가 각각 독립되어 있다.

히트파이프에서의 열회수(열교환)는 [그림 12]에서와 같이 중간 분리판을 경계로 하여 폐열(배기)과 급기가 통과하게 되면 열교환기에 내장된 각각의 히트파이프가 [그림 11]에서와 같이 폐열 통과 부위에서는 가온되어 파이프 내부의 작동 유체도 승온, 증발된다. 가온 증발된 증기 (Vapor)는 히트파이프 전체를 가온하게 되므로 급기는 가온된 히트 파이프를 통과하면서 승온된다. 급기 통과 부위의 히트파이프는 급기에 의해 열을 방출하게 되므로 작동 유체 (Vapor)는 잠열을 토해내고 응축된다. 응축된 작동 유체는 wick 의 모세관력에 의해 다시 배기측 (고온부)으로 환류하게 된다. 이와 같은 히트파이프 내부에서의 증발, 응축, 환류 작용이 연속적으로 일어나게 되므로써 폐열이 급기측으로 이동 (열회수)하게 된다. 이러한 전열과정에서 작동 유체의 환류작용을 원활하게 하기 위해 필

요한 경우 고온부 (폐열측)를 저온부 (급기측)보다 낮게 경사도를 주어 중력에 의한 환류 작용을 원활하게 해준다. 경사 각도는 비교적 저온 공정 및 공조 폐열의 경우 0~3°, 산업용의 경우는 6°이상으로 설치되고 있다 .



[그림 11] 히트파이프식 열교환기 구조 [그림 12] 히트파이프 열교환기 설치도

2) 히트파이프 열교환기의 특성

히트파이프 열교환기는 기체와 기체와의 열교환 분야에서 다른 어떠한 형식의 열교환기보다도 유리한 적용 성능을 갖고 있다. 히트파이프의 주요 특성은 다음의 8개항으로 요약할 수 있다.

○ 콤팩트하고 경량이다 (종래형의 1/3 크기) - 히트파이프의 내부 전열성능은 7,000 ~ 10,000 kcal/m²h℃로서 일반적인 열교환기와 비교할 수 없는 매우 큰 값이 되고 Sheet Fin 형상으로 제작되어 단위 용적당 전열 면적을 대폭적으로 증가시켰기 때문에 종래의 공기에열기의 1/3 크기 및 중량으로도 종래형 이상의 열회수가 가능하므로 설치 공간이 좁은 장소에도 설치 가능하다.

○ 열회수율이 높다 (50 ~ 80%) - 히트파이프의 폐열회수 성능은 배가스 폐열의 종류 및 회수 회망 범위에 따라 50 ~ 80%로 높게 설계, 제작되나 투자 경제성 측면에서는 50 ~ 60%가 적정 수준이다. 이 경우 히트파이프의 폭 (배가스 통과 거리)은 25 ~ 35 cm 범위이다.

○ GAS 의 누설이 없다 - 회전재생에서와 같은 급배기의 상호 누설이 없도록 중간 분리판이 설치되어 있다. 공조 및 대형 보일러의 경우 IDF, FDF의 동력절감 및 석탄보일러의 경우 집진기 용량축소의 이점이 있다.

○ 내식성이 높다 - 일반적으로 관형이나 로타리형의 공기 예열기에서는 배가스 출구측 즉 공기 입구측 전열면이 국부적으로 낮아져 저온 부식을 피할 수 없다. LNG 보일러의 경우도 전열면 온도가 배가스의 수증기 노점이하로 될 경우 국부적인 저온부 부식

은 발생 될 수 있다. 히트파이프는 국부적인 저온부가 생기지 않으므로 종래형에 비교하여 월등한 내식 성능을 갖게 된다. (완벽한 내식성이 요구되는 배기의 경우 (SOx, HCl,기타) Heresite 코팅처리됨)

○ 중저온의 폐열도 효과적으로 회수 가능하다 - 히트파이프는 온도 효율 (회수율)이 높기 때문에 일반적인 배가스 폐열 뿐만 아니라 공조 배공기 폐열 회수에도 적용 될 수 있다.

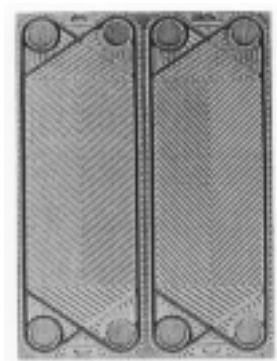
○ Draft 손실이 적다 - 배가스 및 공기의 통과 거리가 30 cm 내외이므로 풍압손실은 10 ~15 mmAq 정도이다.

○ 유지 비용이 없다 - 히트파이프는 구동부가 없어 동력이 불필요하고, 재료의 마모, 고장 등의 염려가 없어서 maintenance 가 불필요하다.

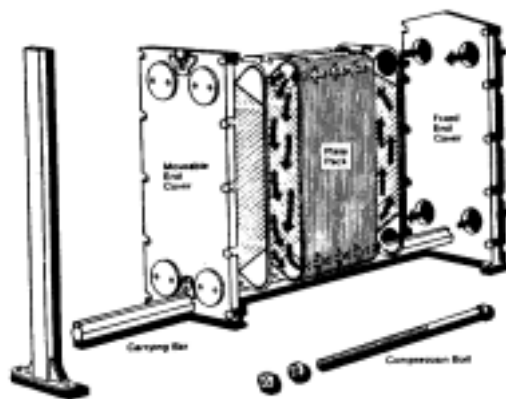
○ 사용목적에 대하여 최적의 모델을 선택 적용할 수 있다 - 히트파이프는 사용 목적에 따라 Fin 및 Tube의 형상, 재질, 크기, 내식 코팅등을 임의로 선택 적용시킬 수 있다.

다. 판형 열교환기

[그림 12] 히트파이프 열교환기 설치도판형 열교환기는 Frame, Plate pack, Tie bolt 로 구성되며 독립된 판(Plate)을 안내봉에 취부하고 고정판(Frame) 및 이동판 사이를 Tie bolt 로 체결, 조립된다. [그림 13]과 [그림14]에 판형 열교환기의 전열판의 형상과 구조를 나타내었다.



[그림 13] 판형 열교환기의 전열판 형상



[그림 14] 판형 열교환기의 구조

열교환 유체의 기밀 유지를 위해 port 주위에는 이중구조의 gasket가 설치되어 있으므로 누설 발생시 유체의 혼합을 방지하고 이중구조 gasket 사이의 공간은 외부와 통해져 있으므로 누설 유체는 외부로 vent 되어 누설 부위를 확인할 수 있다. 두개의 판형

으로 구성된 유로는 plate에 형성된 돌기부에 의한 난류와 와류현상으로 이상적인 열교환 및 스케일생성 방지효과가 있다. 적용성 측면에서 전열면적 증감이 용이하며 1기의 열교환기로 다양한 열교환이 가능하다.

그리고 판형 열교환기의 재질은 열교환 유체의 종류와 운전조건에 따라 SUS 304, 316, 316L, Hastelloy, Nickel Tantalum, Titinium, Titan-Palladium등을 선택하여 사용할 수 있다. 그리고 전열판사이의 gasket 는 열교환 유체의 종류에 따라 다양한 재질로 선택할 수 있으며, 이를 <표 10>에 요약하여 나타내었다.

<표 10> 가스켓 종류에 따른 적용 유체

가스켓 종류	적용 유체 종류
SBR	비유지성 일반유체
NBR	일반유체 및 유지성유체
Resin cured butyl	일반화학유체
Silicone	고온 및 부식성 일부체
Fluoroelastomer	일부유기 용제
Compressed asbestos fiber	고온 또는 방향족 용제
EPDM	고온의 일반유체
Acid resistant fluoroelastomer	고농도 무기산

일반적으로 이러한 판형 열교환기는 Shell & tube 열교환기보다 높은 열전달계수를 가지고 있으므로 적은 열교환면적이 필요하나, 압력이 높은 경우에는 적합하지 않다. 제작 업체마다 조금씩 특성이 다르고 표준화된 부품을 조립하여 사용하므로서 설계인자들이 한정되어 있다. 때문에 설계시 이들 제작업체의 설계 자료를 참고하여야 하며, 이러한 판형 열교환기의 일반적인 특징은 다음과 같다.

- 높은 열전달계수로 인해 판형 열교환기보다 필요 전열면적이 적다.
- 열효율이 높다
- 적은 온도차로 운전이 가능하다.
- 쉽게 제작이 가능하며, 설치공간이 적게 필요하다.
- 청소등 유지보수가 쉽다.
- 열교환기의 면적을 쉽게 변경할 수 있다.
- 체류시간이 적어 열에 민감한 물질에 적합하다
- 온도변화가 크거나 압력이 큰 곳에는 사용이 불가능하다
- 크기와 용량의 한계가 있다
- fouling이 있는 부분에서는 사용하기가 어렵다
- leakage 가 쉽게 일어난다
- 화재의 경우, 오래 견디지 못한다

Marriott [1971]은 plate-and-frame 열교환기와 shell & tube 열교환기를 비교하여 <표 11>에 나타내었다. 이러한 열교환기의 비교에 사용된 조건은 2가지 유체는 모두 물이며, 고온과 저온의 유체의 유량이 모두 50 m³/h 이며, 고온유체의 입출구온도가 각각 80°C/40°C 이며, 저온유체의 입출구온도가 각각 20°C/60°C 이다.

<표 11> 판형 열교환기와 관형 열교환기의 비교 결과

항목	관형 열교환기	판형 열교환기
heat transfer area, m ²	25	85
overall h.t.coeff. (clean), kcal/m ² h°C	5,200	1,750
fouling factor, m ² h°C/kcal	0.00006	0.0001
overall h.t.coeff. (service), kcal/m ² h°C	3,960	1,500
pass system (hot/cold)	1/1	8/baffled
channels or tubes per pass	40	56
plate or tube size	0.32 m ²	17/20mm x 3mm
calculated pressure drop, mwg	4	6
J, mwg/NTU	2	3
pumping power, hp	1.1	1.65
weight (empty), kg	615	2,400
weight (full), kg	720	3,100
overall size (including cleaning space), m	1.5x0.7x1.4	7.0 x 0.7 x 0.7
floor area required, m ²	1	5

6. 부식성 배가스 폐열회수 열교환기

연소 배가스 폐열회수에서 내식성 열교환기란 황(S)함유 저급 연료를 사용하는 보일러나 요·로 또는 부식성 물질을 함유한 각종 소각설비 등으로부터 배출되는 배가스(flue gas)의 폐열회수를 극대화하기 위한 폐열회수 열교환기이다. 즉, 연소 배가스중에 포함 배출되는 SO_x, NO_x, HCl, 기타 부식성 물질에 대하여 화학적으로 안정성을 갖는 소재를 이용한 열교환기를 의미한다.

국내의 경우는 2차 오일쇼크 이후 flue gas 폐열회수의 내식성 열교환기는 「Q-MAX」, 「Q-TUBE」 및 Glass tube 형의 열교환기가 소개된 바 있으나 Glass tube형이 수 대 보급되었을 뿐이다. 따라서 저급 연료 사용의 열원설비(보일러, 요로, 소각로 등)의 배가스 폐열회수는 산(Acid) 부식문제로 일정 온도 이하까지는 회수 불가능한 영역으로 인지되어 왔다.

이와 같은 현실에 대하여 열교환기의 저온부식에 대한 개념정리와 산노점 이하의 영역에서도 완벽한 내식 성능을 갖는 테프론(Teflon)소재의 flue gas 폐열회수 열교환기에 대한 특성과 적용성 및 투자 경제성 등에 대하여 관련 정보와 제조사의 자료를 참고하여 기술하였다.

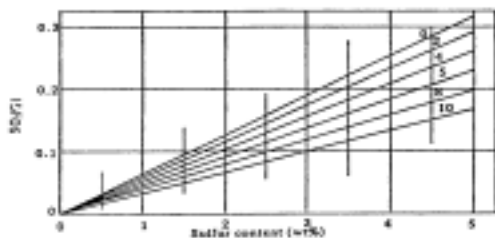
가. 연소 배가스의 저온 부식과 파울링

1) Flue Gas 중 황산화물과 산노점

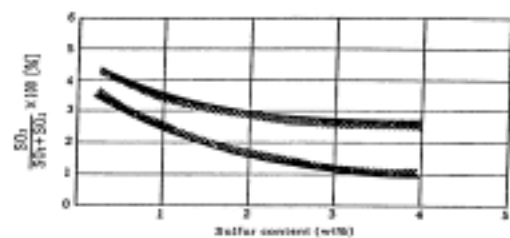
Flue gas 폐열회수 장치에서 저온 부식이라 함은 일반적으로 산부식(Acid Corrosion)을 의미한다. 황(S)함유 연료를 연소시키면 황산화물인 아황산가스(SO_2)가 발생하고 이의 일부가 다시 산화되어 무수황산(SO_3)으로 된다. SO_3 는 배가스 중의 수분(H_2O)과 화합하여 황산(H_2SO_4)증기로 되어 이것이 저온 금속 표면에 응축되어 산부식을 발생시키는 것이다.



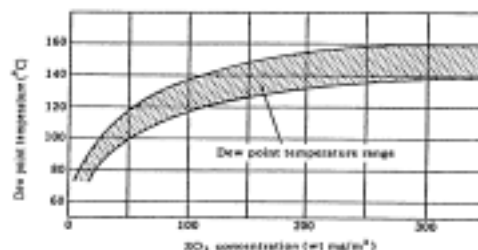
이와 같은 산이 응축되는 최고점의 온도가 산노점(Acid Dew Point)이고, 이 온도는 SO_3 의 농도에 의해 결정되어지는 것이다. 산노점은 [그림 15], [그림 16], [그림 17]과 같이 연료중의 황 함유율, 연소 공기비, SO_2 에서 SO_3 의 전환율 및 배가스 중의 수분 함량 등 4가지 요인과 관계가 있다. 산응축에서 가장 중요한 것은 SO_2 에서 SO_3 로의 산화전환율이며 이와 같은 전환은 화염부에서 SO_2 와 활성산소(O_2)와의 반응 즉, 화염설과 고온부위의 전열관 표면에 존재하는 철과 바나듐 화합물에 의한 촉매반응설이 있으나 결과론적으로 SO_2 는 고온부에서 일부가 산화되므로 SO_3 농도는 연료중의 S함량, 화염온도 및 공기비에 관계가 있다고 할 수 있다.



[그림 15] 황함유량에 따른 SO_2 의 농도



[그림 16] 황함유량에 따른 SO_3 변환



[그림 17] SO_3 농도에 따른 산노점

2) 저온부식과 냉단 온도(저온부에서의 전열면 재질온도) 관리

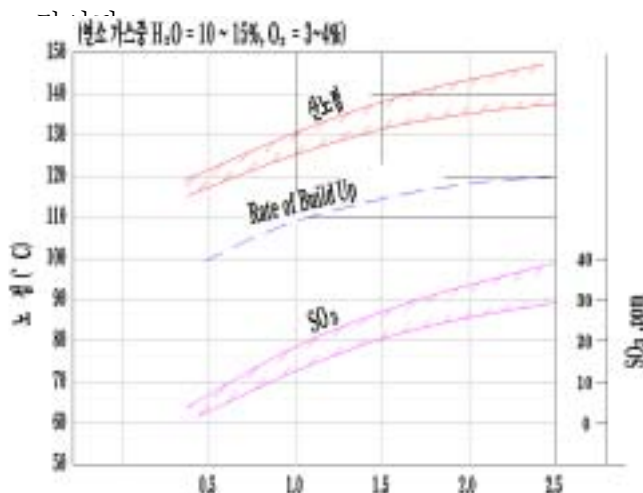
배가스 폐열회수용 열교환기의 냉단온도는 대형발전보일러나 일반 산업용보일러 등 B-C유 사용 열발생설비의 경우 105~115°C로 관리하고 있다. S함량 1.6% 이상의 고유황 중유를 사용했던 오래 전부터 배가스 열교환기의 냉단온도는 115°C를 넘기지 않았다. 이 온도는 실제적인 산노점 보다 상당히 낮은 값이다. 이와 같은 냉단온도 관리는 산노점 부근에서는 산응축이 거의 일어나지 않고 있으며 실질적으로 산응축에 의한 부식 발생 온도는 산노점 보다 약 20°C 정도 낮은 수준임을 의미한다.

[그림 18]은 일반적으로 적용될 수 있는 조건 즉, 연소 가스중 H₂O가 10~15%, O₂가 3~4% 범위에서 연료 중 S함량에 따른 SO₃ ppm, 산노점 그리고 실제로 산응축이 본격화 되는 R.B.U. (Rate of Build Up)점을 표시하고 있다.

○ 연료 중 S 0.5% B-C 사용의 경우 : 100°C

○ 연료 중 S 1.0% B-C 사용의 경우 : 110°C

열 발생설비에 있어서 열 손실은 대부분이 배가스 열손실이다. 가급적 배가스 손실을 줄여 연료를 절약하기 위해서는 산부식을 일으키지 않는 범위에서 최저수준까지 배가스 온도를 낮게 배출



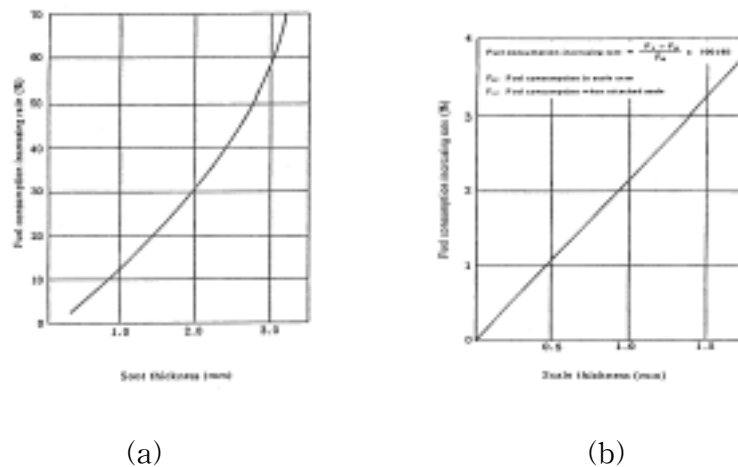
[그림 18] 황함유량에 따른 RBU와 산노점의 변화

그러나, 배가스 폐열회수 열교환기(GA/H, Economizer) 설치시 공기에열기(GA/H)의 경우 저온부 냉단온도는 열교환기(GG/H) 입구 공기온도와 최종 배가스온도와의 산술 평균값이 되므로 급기온도 0~20°C 의 경우 배가스 최종 배출 온도는 230~210°C로서 연소 입열의 10~12%를 초과하고 있다. 발전용 보일러의 경우는 증기식 공기가열기(SA/H)를 설치하여 급기를 예열 공급함으로써 배출 가스온도를 150~180°C범위로 관리하고 있다.

탈기기가 없는 에코노마이저(Eco.)는 대부분의 발전 보일러에는 채용되고 있으나, 일반 증기보일러에는 채용되지 않고 있다. 발전보일러의 경우는 급수 중의 용존산소 관리 목적의 탈기기(Deaerator) 출구 급수온도가 120~140°C이므로 GA/H 전단에 설치되고 있다. 일반 증기보일러의 경우는 급수온도가 60~80°C 범위이므로 저온 부식을 피하기 위해서는 별도 열원의 급수예열기(Feed Water Preheater)를 설치해야 하나 열교환기의 온도차이의 감소로 폐열회수의 큰 효과를 기대하기 어렵다.

3) 전열관의 파울링

부식성의 배가스에는 대개 오염성분을 함유한 분진이 다량 함유되어 있다. 이러한 배가스에 열교환기를 사용하는 경우, 전열면에 분진의 부착으로 인한 파울링 현상이 발생한다. 이러한 오염물질인 검댕이와 스케일의 열전도도는 그들의 성분과 침적상태에 따라 다르게 나타나나, <표 12>에 나타난 것과 같이 일반 탄소강의 열전도도에 비하여 상당히 낮게 나타난다. 따라서 이러한 분진의 부착은 전열면에 단열재의 역할을 하여 보일러 등의 열효율을 급격하게 낮추게 된다.



[그림 19] 전열면의 검댕이(a)와 스케일(b)에 의한 연료사용량의 증가율

<표 12> 전열면 분진의 열전도도

스케일 또는 다른 재질	열전도도 (kcal/mh°C)
soot	0.06 - 0.1
oily matter	0.1
scale as main component of silicates	0.2 - 0.4
scale as main component of carbonate	0.4 - 0.6
scale as main component of sulfate	0.6 - 2
mild steel	40 - 60

스케일에 의한 문제를 피하기 위하여 적절한 수처리가 필요하며, 정기적인 청소가 필요하다. 급수측의 전열면의 청소는, 수처리 방안에 따라 다르지만, 대개 일년에 한번 정도 필요하며 이 경우 브러쉬를 사용한 인력에 의한 청소, 방청제를 함유한 산성액을 사용한 화학적 청소방법등이 사용된다. 화학적 청소방법은 전문가의 도움을 받거나 주의하여 사용하여야 한다. 만약 후처리가 적절하지 못하면, 화학세관에 의한 부식의 가능성이 있다.

가스측 전열면의 청소는 대개 한달에서 3달사이에 한번 씩 브러쉬등으로 청소하여야 한다. 이러한 기간 중에도 열교환기 출구에서의 배가스의 온도가 청소 직후의 온도보다 약 30 °C 이상 높게 나타나는 경우, 청소가 필요하다. 만약 연관보일러의 용량이 충분하면, 특수한 강철재의 난류발생장치(steel tubulator)를 연관에 넣어 연관내의 난류강도를 높여 열전달 계수를 증대시킬 수 있다.

나. 테프론 열교환기

1) 열교환기의 소재와 내식성 재료

폐열회수를 위한 각종 금속제 열교환기의 경우 철강재료인 탄소강 및 저합금강, 주철, 스테인레스강과 기타 합금강, 비철재료인 구리, 알루미늄과 그들 합금으로 분류할 수 있으며 미국 Battele 연구소에서 90여종의 금속재료에 대한 부식실험을 실시한 결과 다음과 같은 재질은 가스보일러 응축형 열교환기 재질로 적합하지 않다는 결론을 얻었다.

- 탄소강, 저합금강, 주철
- 크롬성분이 없는 니켈합금
- 몰리브덴성분이 없는 니켈크롬합금
- 모든 구리 및 알루미늄 합금
- 주석, 아연, 카드뮴

금속재료 중 저온부식현상이 적은 재료로는 규소철, 티타늄, 페라리움, 인코넬, 하스텔로이 등이 있으나 대부분 가격이 고가로서 특수 용도에만 사용하고 있을 뿐이어서 폐열회수용 범용 열교환기로는 경제성이 매우 낮다. 황산 증기나 수용액에 대한 내식성이 강한 비금속 재료로는 세라믹, 유리, 내산법랑, 불소수지 코팅재, 에폭시, 플라스틱, 실리콘재료가 있다. 탄화규소질 세라믹은 800 °C 이상의 고온 폐열회수에 적합하며 유리는 내산성은 우수하나 부스러지는 성질의 극복이 어렵고 내산법랑은 글래스 라이닝 이라고도 불리며 일반적으로 화학용기 탱크류등에 많이 사용되고 있으나 대형화된 소성로가 필요하고 제작비용이 많이 들어 폐열회수용 열교환기 재질로는 특수 용도를 제외하고는 부적합하다. 불소수지란 불소원자를 함유한 합성고분자(플라스틱)를 말하며 1938년 미국의

듀폰사에 의해 테프론이라는 이름으로 소개된 이래 코팅 방법에 의해 응용범위가 광범위하게 확산되어 있으며 통산 PTFE, PFA, FEP, EPE, ETFE, PCTFE, ECTFE, PVDF, PVF 등이 있으며 열교환기 코팅 재료로는 내열성이 우수한 PTFE와 PFA가 주로 사용된다. 불소수지는 표면온도 300°C미만의 산성 용액 및 가스 분위기에서 강력한 내산성이 있어 이를 금속표면에 코팅하여 사용하면 금속재가 갖는 구조적 안정성과 테프론이 갖는 내화학적, 내식성, 비점착성, 발액성, 미끄럼성, 전기절연성 등의 장점을 고루 갖추고 있어 내구성이 높은 열교환기를 제작할 수 있어 부식성 가스 분위기에서의 폐열회수에 널리 이용되고 있다.

폐열회수용으로는 에어후로리이사에서 보일러, 소각로, 배연 탈황장치(FGD)의 배연방지용 열교환기(GGH), 내식성 배기덕트 등에 내식성 열교환기를 보급하고 있다.

2) 불소수지 코팅재료의 특성

○ 비점착성 - 불소수지 코팅 열교환기는 표면에 물을 떨어뜨려 접촉각을 측정한 결과 접촉각이 너무 커서 보일러 배가스 중의 분진 및 SOOT 또는 급수중의 스케일이 잘 달라붙지 않으며 달라붙더라도 물세척 등으로 간단히 제거할 수 있어서 장기간의 사용시에도 전열성능의 저하가 매우 적기 때문에 오염물질이 많은 폐가스 열회수에 적합한 특성을 갖고있다. 또한 불소수지 코팅표면에는 물이나 기름이 잘 달라붙지 않기 때문에 청소가 용이하고 열팽창계수가 크므로 적은 온도 변화에도 신축작용이 크고 장시간 사용에도 표면이 오염되지 않아 자동적으로 청결하게 유지된다.

○ 내화학적 - 거의 모든 화학약품에 대하여 반응성이 없고 불활성이므로 어떠한 용제에도 분해하지 않는 이상적인 화학구조를 가지고 있으나 알칼리금속에 불소수지를 코팅한 경우에는 알칼리금속과 고도의 반응성을 지닌 불소화합제의 침투가 일어날 수 있으므로 주의하여야 한다.

○ 전기적 특성 - 불소수지는 광대역 주파수에서 높은 절연성, 낮은 손실율과 우수한 저항율을 갖고 있어 정전기 방지 목적의 절연 코팅재로도 사용되며, 특히 고주파에 대한 특성이 좋아 위성방송부품, 컴퓨터 전선 등에도 사용되고 있다.

○ 전열성능 - 불소수지 자체의 열전도도는 강재의 1/100 정도로 낮기 때문에 전열성능은 불량하나 불소수지 코팅 두께가 1.0mm이하로 극히 얇으므로 총괄전열 성능에는 크게 영향을 미치지 않는다.

3) Flue Gas H/E 의 용도별 구조와 적용범위

○ 공기에열기 등 GAS/AIR 및 GAS/GAS 열교환기

종래의 관형 공기예열기와 유사한 구조이며 Glass Tube형, Teflon 라이닝 Glass Tube형, Teflon Tube형 등 3종류가 있다. 어느 경우이든 최고 사용 안전온도는 250°C로 규정하고 있으나 스테인레스강 또는 탄소강등과 같은 일반 소재와 조합하여 300°C 이상의 고온 배가스에도 적용이 가능하다. 배가스 온도 기준은 250°C이하이며, 250°C 이상인 경우는 다단(Pass수)으로 설계하여 스테인레스강 또는 탄소강 소재와 조합하여 사용한다.

○ 에코노마이저등 GAS/WATER 열교환기

종래의 Tublur형과 전혀 다른 구조적 특징을 갖고 있다. 종래형은 헤더, 튜브, U-BEND 등의 용접 일체형으로 되어있으나 Teflon Lining 신기술의 에코노마이저는 상부 Header Plate에만 용접되고 하부는 Cap으로 Sealing 처리되어 열응력을 받지 않고 내식 소재 (Teflon) Lining을 완벽하게 처리할 수 있는 구조로서 부식에 의한 설비 사고는 생기지 않고 있다. 적용범위는 배가스측이 250°C 이하이며, 급수측은 150°C 이하 (40 Kg/cm² 이하) 이다. 배가스 온도가 250°C 초과인 경우는 일반소재의 열교환기와 직렬로 2단 설치하여 적용이 가능하다.

○ 백연방지 HEATER (GGH, Steam/GH)

현재에도 FGD (배연탈황시설)등 각종 소각배기 세정 Scrubber 의 세정 배기는 백연 방지 대책으로 백연방지 Heater를 설치하여 습구온도보다 40 ~ 50°C 정도 높게 가온, 배출하고 있으나 국내의 경우 GAS 세정 Scrubber의 가스 Heater는 대체적으로 증기 가열식 열교환기가 채용되고 있으므로 막대한 증기를 소비하고 있다. 또한 세정배기 중의 잔존 부식성 물질에 의한 부식문제로 Heater의 수명은 2-3년에 불과한 실정이다.

GGH는 이와 같은 배가스의 가온을 Scrubber 입구의 배가스 폐열을 이용함으로써 기존 Steam 사용을 100% 절감하고 장치수명도 반영구적으로 유지할 수 있는 장점이 있다. GGH 및 Steam-Gas Heater의 배가스 접촉부위는 Teflon Tube 및 Teflon으로 100% Lining 처리되고, 세정 후 Clean Gas 접촉부위 (Tube Plate 등)도 고내식 재료인 하스테로이-씨 합금(Hastelloy-C 22) 또는 Ni 합금으로 제작된다.

4) 배가스의 적정 폐열회수 온도와 Duct 부식

열교환기의 소재 특성에서 언급된 바와 같이 열교환기는 완벽한 내식 특성을 갖고 있으므로 저온 영역에서의 사용에 제한이 없다. 따라서 FGD나 DeNOx 설비의 GG/H 용도의 경우는 회수 온도에 제한이 없다. 그러나 일반 배가스 폐열회수의 경우는 열교환기 후단의 연도와 연돌의 부식 문제를 고려하지 않으면 안된다. 또한 지나친 폐열회수는 연돌에서의 백연 발생을 수반하므로 배가스의 수증기 노점보다 40 ~ 50 °C 높은 온도로 배출될 수 있도록 계획되어야 한다. B-C유 연소 배가스의 경우 배가스중 수분함량이

10%범위이므로 수증기 노점 (약 50 ℃)을 고려하여 90 ~100 ℃가 적정하다고 할 수 있으나 열교환기 후단의 배기 Duct 및 금속제 연돌의 부식문제를 고려하여 110 ℃이상이 타당하다고 판단된다. 또한, 배기 Duct 보온의 경우 배가스 배출온도는 R.B.U점 이상이면 부식에 의한 Duct 수명 단축은 크게 염려되지 않는다고 판단된다. Duct 및 연돌의 금속 재질은 스테인리스 보다 일반 탄소강 (Carbon Steel)이 유리하다. 특히, 90 ℃ 이상에서는 더욱 그렇다. 국내 H사의 경우 S 1.0%, B-C유 사용 발전보일러에서 SA/H 없이 GA/H (Tubular형) 후단의 배가스 온도를 105-125 ℃범위로 수년간 운전해왔으나 Duct 나 연돌에 특별한 이상 징후는 발견되지 않고 있다.

7. 가스보일러의 응축형 물유동층 열교환기 개발사례

아파트단지, 목욕탕과 공장등에서 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. 전열면이 항상 젖은 상태를 유지하여 산성성분의 농축으로 인한 부식 가능성이 적다. 대전 시내의 H 아파트의 가스보일러의 배가스로 부터 폐열을 회수하여 난방수를 예열하기 위한 응축형 물유동층 열교환기를 설치하여 현장실증실험을 수행하였다.

가. 아파트 열교환기 실험장치

물유동층 열교환기 현장실험을 위하여 대전시내의 1380세대의 H 아파트의 가스보일러에서 배출되는 배가스의 일부를 이용하여 폐열을 회수할 수 있는 물유동층 열교환기를 설치하였다. [그림 20]에는 H아파트의 물유동층 열교환기의 현장설치장면을 나타내었다.



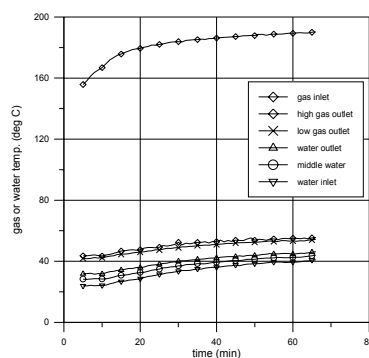
[그림 20] 물유동층 설치장면

대전 H 아파트의 난방시스템은 8 ton/hr 보일러 3대가 중앙 기관실에 설치되어 있으며, 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 스팀가열기로 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 스팀가열기로 공급되는 난방수를 예열하므로서 난방수 스팀가열기에 사용되는 보일러의 수증기량을 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.

나. 현장실험결과

물유동층 열교환기의 아파트 난방용 보일러에의 현장실증실험에서 난방용 보일러와 물유동층 열교환기를 작동하여 물유동층 열교환기에서의 배가스와 난방수의 입출구온도를 측정된 결과를 [그림 21]에 나타내었다. [그림 21]에 나타난 물유동층 열교환기의 정상적인 운전상태를 나타내는 시간동안의 물유동층 열교환기에서의 배가스 및 난방수의 입출구온도의 측정 결과로부터 평균 값을 계산하여 <표 13>에 나타내었다. <표 13>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 크지 않은 것으로 나타나, 물유동층 열교환기의 열효율이 충분히 높다고 볼 수 있다.



[그림 21] 배가스 및 난방수 입출구온도

<표 13> 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.

이러한 보일러 운전자료를 분석하여 보면, 1년간 총 가스사용량은 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 LNG 가스소모율을 측정한 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.

다. 현장실험결과 분석

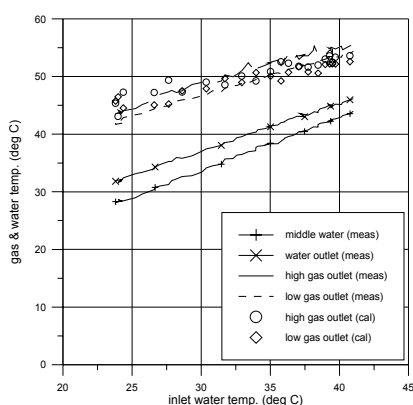
아파트 물유동층 열교환기의 현장실증실험에서의 열교환기의 회수열량은 난방수의 입출구온도차와 난방수의 유량을 측정하면 계산이 가능하다. 그러나 좀 더 자세한 열교환기의 전열성능을 분석하기 위하여 물유동층 성능 설계프로그램을 사용하여 배가스의 유량 및 잠열회수량등을 계산하여 측정 결과와 비교할 수 있다.

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

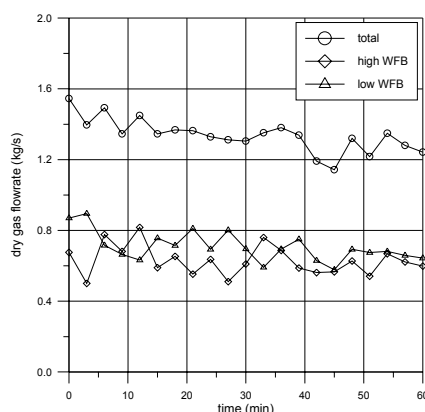
물유동층 열교환기 설계 프로그램을 사용하여, 각 측정시간에서의 난방수의 입구, 중간, 그리고 출구온도와 난방수유량의 측정한 결과를 입력자료로 사용하여 배가스의 상단과 하단에서의 배가스의 출구온도를 계산하였다. 이러한 계산 과정에서 열교환기의 회수열량을 계산치와 측정치를 비교하면서 물유동층의 상단과 하단에서의 배가스 통과유량을 각각 구하였다. 그리고 이러한 계산 과정에서 잠열회수량과 에너지절감율을 계산할 수 있다.

이러한 물유동층 열교환기의 성능예측의 정확성을 검토하기 위하여 난방수 입구온도의 변화에 따른 상단과 하단의 물유동층에서의 배가스의 출구온도에 대한 계산결과와 측정결과를 비교하여 [그림 22]에 나타내었다. [그림 22]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 23]에 나타내었다. [그림 23]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.



[그림 22] 물 및 가스온도의 비교

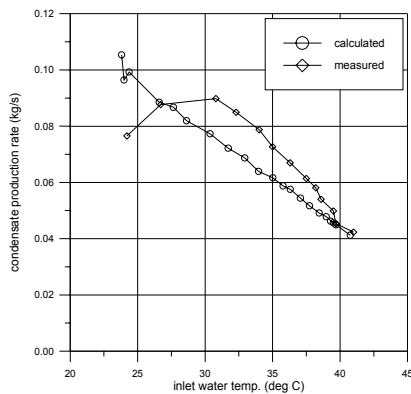


[그림 23] 가스유량의 변화

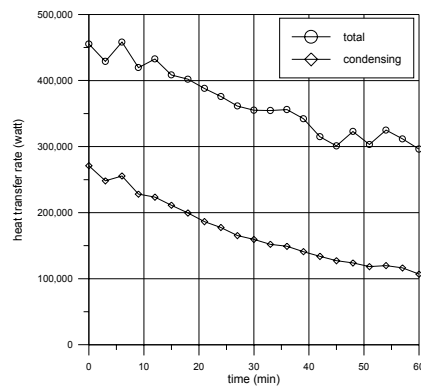
그리고 물유동층 열교환기의 현장실증실험에서 성능실험 시간동안 물유동층 열교환기에서 배출되는 응축수의 유량을 측정하였다. 이것은 일정시간 동안에 용기에 받은 응축수의 무게를 측정하여 응축수의 순간유량을 계산하였다. 이러한 응축수의 유량은 난방수의 입구온도, 배가스의 입구온도, 그리고 배가스 통과유량에 따라 변하나, 대개 난방수의 입구온도의 영향을 많이 받는다. 따라서 [그림 24]에 난방수 입구온도에 따른 응축수의 발생량의 측정결과와 이론적 계산결과를 비교하여 나타내었다. [그림 24]에서 보면, 응축수 유량의 계산결과는 비교적 일정한 변화 경향을 나타낸다. 그러나, 응축수 유량 측정결과는 처음에는 작게 나타나나 중간정도에 이르면 측정값보다 오히려 크게 나타나고 이후에는 점점 차이가 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 경향의 차이에도 불구하고 전체적인 응축수 유량에 대한 계산결과는 비교적 정확한 것으로 볼 수 있다. 이러한 경

향의 차이는 물유동층 열교환기의 성능의 예측의 부정확성에 의한 것이 아니고, 시간에 따른 정확한 응축수의 순간유량의 측정이 어렵기 때문인 것으로 볼 수 있다.

물유동층 열교환기의 설계 프로그램을 사용한 열교환기 성능분석 결과, 시간에 따른 전체열량과 잠열회수량의 변화를 [그림 25]에 비교하여 나타내었다. [그림 25]에서 전체 회수열량은 난방수온도와 유량으로부터 직접 구할 수 있으며, 잠열회수열량은 응축수의 발생량과 수증기의 잠열에 의하여 결정될 수 있다. 따라서 [그림 24]에서 잠열량의 측정 결과와 해석결과를 간접적으로 비교할 수 있으며, 이로서 잠열회수량의 정확성을 판단할 수 있다.



[그림 24] 응축수 발생량의 비교



[그림 25] 열교환기 회수열량

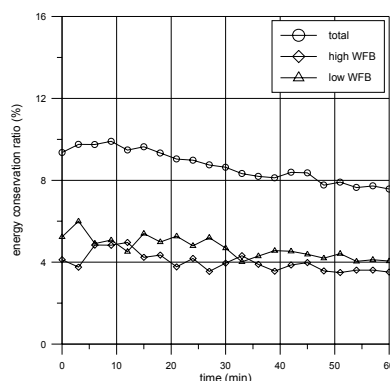
[그림 25]에서 보면, 전체회수열량은 초기에 약 450 kW 정도이며 이후 점점 줄어들어 약 300 kW 까지 감소한다. 물유동층 열교환기 성능실험에서 보면, 시간이 경과할수록 난방수의 입구온도가 증가하며, 배가스의 입구온도는 증가하고 물유동층의 배가스 통과유량이 감소하는 것으로 나타났다. 그러나, 시간이 경과하면서 열교환기 회수열량이 감소하는 원인은 주로 난방수의 입구온도가 증가하기 때문인 것으로 볼 수 있다.

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 통하

여 계산한 물유동층 열교환기의 시간에 따른 에너지 절감율의 변화를 [그림 26]에 나타내었다. 그리고 이러한 계산에서 도출한 상단과 하단의 물유동층에서의 에너지회수에 의한 에너지 절감율의 변화도 같이 나타내었다. [그림 26]에서 보면, 물유동층 열교환기의 에너지 절감율은 초기에 약 10%에서 시작하여 시간이 경과하면서 감소하여 약 7.5%까지 감소한다. 그리고 하단과 상단의 물유동층 열교환기의 에너지 절감율은 시간에 따라 약간 불규칙하게 나타나나 대체로 하단의 물유동층 열교환기의 에너지 절감율은 상단 물유동층의 에너지 절감율보다 다소 높게 나타나는 것으로 나타났다.



[그림 26] 에너지절감율 변화

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, 열교환기 작동시간이 경과하면서 응축수 pH가 약 4.1 정도까지 내려가는 것으로 나타났다.

환경규제를 보면, 열교환기에서의 응축수의 pH의 허용치는 5.8 - 8.5의 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 희석하므로서 응축수의 pH를 허용기준내로 유지할 수 있음을 알 수 있었다.

라. 성능평가 및 경제성 분석

<표 14>에 물유동층 열교환기의 전체 성능을 나타내는 여러 가지 항목의 평균 값을 구하여 나타내었다.

<표 14> 아파트형 물유동층 열교환기의 전체 성능 요약

항 목	계산결과	항 목	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 열회수에 의한 보일러의 에너지 절감율은 약 8.7% 정도로 나타났다.

본 연구의 H아파트에 설치한 물유동층 열교환기의 성능 평가 결과를 요약하여 <표 15>에 나타내었다.

<표 15> 아파트형 물유동층 열교환기의 성능평가 결과

항 목	계산결과	항 목	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. 따라

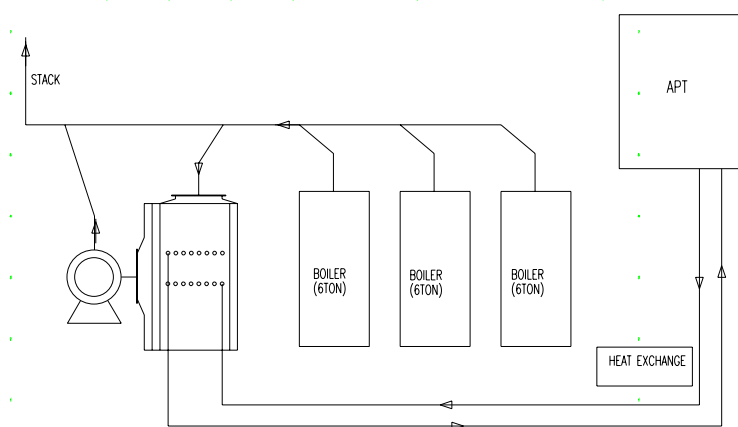
서, 보일러의 배가스 폐열을 사용하여 난방수의 예열에만 사용하여도 대부분의 배가스 열량을 회수할 수 있으며, 실제로 열교환기의 출구온도가 약 50 °C 정도로 매우 낮은 상태로 배출되므로 더 이상의 폐열회수는 경제성이 매우 낮은 것으로 볼 수 있다.

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 3 년 정도인 것으로 평가되었다.

마. 아파트 실제적용 현황

서울 W아파트 단지(총658세대 22,322평)의 LNG를 연료로 사용하고 있는 18 TON (6ton 3기) 보일러에 2001년 12월에 물유동층 열교환기를 설치하였다. 열교환기에 전체 배가스중 90%를 통과시켜 에너지를 회수하는 시스템을 설치하였으며, [그림 27]에 폐열 회수시스템의 공정도를 나타내었다.

W아파트의 1년동안의 연료사용량은 1,047,315 m³ 이며, 보일러의 열효율은 82%, 배기가스의 온도는 211°C, 연료가스의 연사용량의 80%를 난방용으로 사용하며, 온수가열로서는 20%를 사용한다. 아파트의 겨울에는 일일 7~8시간 가동하며, 년평균 일일가동시간은 3.22시간이다. 물유동층 열교환기를 사용하여 배가스의 열을 회수하여 난방수 가열에 사용되는 증기가열기의 8기중 1기에 사용하르로서 8개동중 1개동의 난방을 담당하도록 하였다. 따라서 난방 면적은 전체면적의 약 14.6%에 해당되는 1개동의 난방을 충족할 수 있었다. W아파트의 열교환기 설치 전후의 2002년 1월과 2월의 가스사용량을 측정하여 < 표 16>에 비교하여 나타내었다.



[그림 27] 서울 W아파트 설치도

<표 16>서울 W아파트 설치 전후의 사용량 비교

연료사용량 비교							
월	설치 전				평균	설치 후	율
	1998년	1999년	2000년	2001년		2002년	
1	176,288	180,518	181,646	199,581	184,508	161,311	87%
2	137,528	150,353	172,647	161,719	155,562	128,428	83%

<표 16>에 나타난 사용량은 설치전 3년간 사용량을 평균한 수치와 설치후 절감된량을 비교 하였다. 그리고 아파트는 겨울에 주로 난방에 사용 되는 실정이므로 인근 아파트의 난방 연료비(평당단가)를 비교하여 <표 17>에 나타내었다.

<표 17>서울 W아파트 설치 후 인근아파트와 난방비 비교

2002년 1월분 난방비 비교					
미설치단지			평균	설치단지	율
C 아파트	S아파트	H아파트		W아파트	
3,664	4,185	3,997	3,949	3,054	77%

설치 후 서울 W아파트 결과를 종합하면 <표 18>에서와 같이 가동시간 단축 및 가스소모량의 감소에 의한 연료절감율은 약 13% 이상으로 판단된다. 이는 보일러의 효율 상태에 따라 다소의 차이는 있으나 평균 9-13.5% 내의 연료를 절감할 수 있으며 보일러 버너에 연료 공급량을 절감량 만큼 조절하여 사용하므로 사용에는 불편없이 절약 효과를 볼 수 있었다

<표 18> 서울 w아파트 가동시간 및 사용연료량 설치전후 비교

설치 전		설치 후	
가동시간	가스소모량	가동시간	가스소모량
130분	2,205	110분	1,915

서울 W아파트 폐열회수장치를 설치후 에너지절약에 대한 관심도가 향상되었음을 느껴볼 수 있었으며 절감량은 년 125,500m³ LNG를 절감할 수 있으며 투자회수기간은 약 2년 미만으로 산정 되었다.

바. 결론

물유동층 열교환기의 현장실험을 통하여 가스연료를 사용하는 보일러의 배가스의 물

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

본 연구에서는 응축수의 pH 제어를 위하여 일반 급수를 공급하여 응축수를 희석하였으며, 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 공급하므로써, 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, 잠열 회수열량은 전체 회수열량의 약 46% 정도인 것으로 나타났으며, 물유동층에서의 배가스의 출구온도는 약 50 °C 정도이었다. H아파트에서의 현장실증실험 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.

그리고 서울의 W아파트에 상용 물유동층 열교환기를 2001년 12월에 설치하였다. 열교환기를 설치하여, 8개동중의 1개동의 난방을 담당할 수 있었다. 그리고 열교환기 설치 전후의 연료절감율은 약 9-13.5%정도로 나타났으며, 이로 인한 열교환기의 투자회수기간은 약 2년 정도로 평가되었다.

참고문헌

- [1] 일본 에너지절약센터, "Method of Energy Conservation Promotion in Industry", 1994..
- [2] G. Walker, "Industrial Heat Exchangers", Hemisphere publ. co., New York, 1990.
- [3] 에너지관리공단, "에너지관리진단기술교육", 2001.3. 19-22.
- [4] F. Kreith and W.Z.Black, "Basic Heat Transfer", Happer & Row publishers, New York, 1980.
- [5] 김해섭, "폐열회수 열교환기의 활용", 에너지관리공단 자료.
- [6] J. Marriot, "Where, when and how to use plate heat exchangers", Chem. Eng., April 5, 1971.
- [7] 이후용, 김정근, 박상일, "아파트 가스보일러 배가스용 물유동층 열교환기", 제17회 에너지절약웍샵 논문집 pp. 31-40, 2002.10.31-11.1