

〈論 文〉

## 직접접촉식 열교환기내에서 물과 배기가스의 직접접촉에 의한 열 및 물질전달

이 금 배\*

(1991년 10월 15일 접수)

### Heat and Mass Transfer between Hot Waste Gas and Cold Water in a Direct Contact Heat Exchanger

Kum-Bae Lee

**Key Words :** Direct Contact Heat Exchanger(직접접촉식 열교환기), Heat and Mass Transfer(열 및 물질전달), Latent Heat(잠열), Diffusion(확산), Convection(대류), Overall Heat Transfer Coefficient(총괄 열전달 계수)

#### Abstract

An experiment was performed to describe the heat and mass transfer occurring between hot waste gas and cold water through direct contact in a direct contact heat exchanger. This model was then used to obtain an equation of overall heat transfer coefficient based on heat exchanger volume. The diffusion heat transfer rate is 2~3 times larger than the convection heat transfer rate as results of condensation of the water vapor contained in the waste gas. The boiler efficiency increases over 10%.

#### 1. 서 론

소형 열기기중 가장 많은 에너지를 사용하는 것이 보일러이며, 이의 사용에 따른 폐열량과 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, 분진등의 공해 발생률이 가장 많은 것도 사실이다. 현재 산업용 및 난방용 보일러에서 배출되는 배가스의 온도는 200~400℃ 정도가 되며, 배가스로 인한 보일러의 효율감소는 10% 이상이 되고 있다. 따라서 이런 폐열회수는 에너지 절약측면에서 상당히 중요하다.

이와같은 폐열을 회수하여 보일러 시스템의 효율을 획기적으로 높이기 위해서는 종래의 간접접촉식 열교환기(indirect contact heat exchanger) 보다는 작동유체들의 직접접촉에 의한 열교환기가 더 유리

하다. 직접접촉식 열교환기(direct contact heat exchanger)는 보일러에서 배출된 배가스에 대향류(counter flow) 형태로 물을 분사시켜 물의 액적과 배가스를 직접 접촉케함으로써 배가스의 현열 뿐만 아니라 배가스에 포함된 수증기(water vapor)까지 응축시켜 잠열(latent heat)까지 회수할 수 있기 때문이다. 현재 외국의 여러 기업체에서는 보일러의 효율을 높이기 위하여 직접접촉식 열교환기를 여러 분야에 사용하고 있다.<sup>(1)</sup>

이러한 열교환기를 보일러 시스템에 사용할 경우 또 하나의 큰 장점은 배가스에 포함된 SO<sub>x</sub>와 NO<sub>x</sub>의 양을 상당부분 격감시킬 수 있다는 것이다.

외국에서는 보일러 시스템에서 직접접촉식 열교환기 사용의 필요성을 상당부분 인식하고 있고,<sup>(1)</sup> 또한 여러 기업체<sup>(2)</sup>에서 이를 사용하고 있지만, 국내에서는 이에 대한 기술이 매우 미미한 상태이다.

\*정회원, 공주대학교 기계공학과

배가스와 물과의 직접접촉에 의한 열전달 연구는 국내에서는 박영재<sup>(3)</sup> 외에는 찾아 볼 수 없다. 박은보일러 집진탈황을 겸한 폐열회수장치의 파일러트 플랜트 건설에 대한 기초자료를 얻기 위하여 물과 배가스의 직접접촉에 의한 실험을 행하여 전열능력을 나타내는 물질전달계수를 실험적으로 측정하여 구한 바 있다.

물과 수증기의 직접접촉에 의한 열전달 연구는 이병철<sup>(4)</sup> 등이 시스템의 수증기 포화압력을 조절하여 이에 따른 열교환기 단위 체적당 열전달계수를 실험적으로 구하였고, 액적의 열전달계수를 구하여 전체시스템에 적용시켰다.

고온의 배가스 및 저온의 공기와 고체입자와의 직접접촉에 의한 열전달 연구는 박상일<sup>(5)</sup> 등에 의해 수행되었으며, 이의 원리는 직접접촉식 열교환기내에서 다단 유동층의 형식을 갖는 저온의 고체입자와 요로등에서 배출되는 고온의 배가스와의 직접접촉에 의해 고체입자가 가열이 되며, 가열된 고체입자는 다른 직접접촉식 열교환기를 통과하면서 공기와 직접접촉하여 공기를 가열하며, 이 공기는 연소용 공기로 사용된다.

물을 냉매로 쓰는 직접접촉식 열교환기의 연구에 대한 또 다른 중요한 과제는 노즐을 통하여 물을 분사시켜 미소 액적을 만들어서 열교환을 시키려는 배가스나 공기와의 접촉면적을 늘리는데 있으며, 액적과 가스의 상호저동에 따른 열전달 효과의 연구에 있다. 따라서 노즐 형상에 따른 열전달 연구,<sup>(6)</sup> 분사 기구에 따른 열전달 연구,<sup>(7)</sup> 분사 속도에 따른 열전달 연구<sup>(8)</sup> 등도 수행된 바 있다.

본 연구는 직접접촉식 열교환기를 이용한 실험을 통하여 열교환기 설계에 가장 중요한 열교환기 단위 체적당 총괄 열전달 계수를 시스템의 작동조건에 따라 구하여 실제 설계자료로 이용하는 데 그 목적이 있다.

## 2. 직접접촉식 열교환기의 특성

### 2.1 직접접촉식 열교환기의 특성

물 대 배가스의 직접접촉에 의한 폐열회수 및 열전달 연구를 위한 직접접촉식 열교환기의 개요도가 Fig. 1에 주어져 있다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 열교환기내에서 물과 배가스의 온도에 따라 다음과 같은 과정이 일어난다. 두번째 부분은 가습(humidification) 과

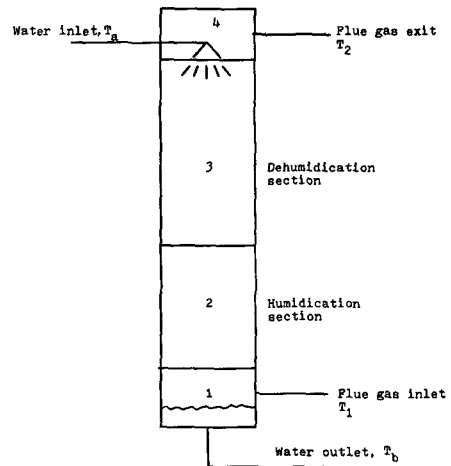


Fig. 1 Schematic of direct contact heat exchanger

정이 일어나는 부분이다. 즉 이 부분에서 물의 온도가 배가스의 이슬점온도(가스 연료 사용시 50~60°C) 보다 높으면 물이 증발되어 배가스에 혼합되며, 따라서 배가스의 절대습도(humidity ratio)는 증가한다. 이 부분에서 배가스가 냉각되어 단열 포화온도에 이르게 되며, 이 배가스의 단열 포화온도는 보일러에서 나오는 배가스의 온도와 습도에 따라 다르며, 출구로 나가는 물의 온도를 결정짓는 변수이다.

열교환기의 세번째 부분은 제습(dehumidification) 과정이 일어나는 부분으로 열교환기의 두번째 부분에서 단열포화온도에 이른 배가스중의 수증기가 응축되어 배가스의 제습이 일어나는 부분이다. 즉 물의 온도가 배가스의 이슬점 온도보다 낮아서 수증기가 응축이 되며, 따라서 배가스의 절대습도는 감소한다. 두번째 부분에서 물이 증발되는 양은 세번째 부분에서 수증기가 응축되는 양에 비하여 매우 미세하기 때문에 보통 무시하는 경우가 많다.

열교환기의 네번째 부분은 배가스 출구온도에 상당하는 포화 증기압의 수증기가 배가스에 혼합되어 밖으로 배출된다.

직접접촉식 열교환기의 설계는 두번째 부분과 세번째 부분의 크기를 정하는 문제에 귀착되며, 이 부분들의 크기는 분무의 타입, 배플(baffle)의 종류와 그 유무, 열교환기의 지름과 높이의 크기등에 따라 결정된다.

직접접촉식 열교환기를 사용함에 대표적인 장·

**Table 1** Characteristics of direct contact heat exchanger

<p>Merits</p>	<p>great increases of efficiency                  pollution prevention                  (decreases of <math>SO_x</math>, <math>NO_x</math>, particles, etc.)                  reduction of investment withdrawl period                  simplicity of operation and handling                  possibility of varios types of baffle plate                  possibility of small size and light weight</p>
<p>Faults</p>	<p>only use of special materials by corrosion                  only use of limited mediums                  need of another process if fused alien substances in the mediums</p>

단점을 Table 1에 수록하였다.

**2.2 온수의 이용방법**

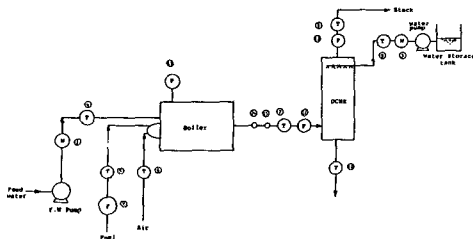
위와같이 많은 장점을 지닌 직접접촉식 열교환기는 회수되어진 온수의 수요가 충분히 있으나에 따라 장치의 성패가 달려있다. 여기서 회수되어진 온수는 산성이 적은 경우에는 직접 사용할 수 있으며, 분진이나 산성이 많은 경우에는 또 다른 간접접촉식 열교환기를 이용하여 깨끗한 온수를 만들어 사용할 수 있다. 또한 분진은 적고 산성이 많은 경우 알칼리성 물을 분사시켜 중화시켜 직접 사용할 수도 있다.

가열되어진 온수는 주로 소용량의 보일러 급수, 수영장, 호텔, 세탁소에서부터 대용량의 방직공장, 화학공장, 펄프 제지공장등 난방용, 온수용, 공정용등으로 다방면에 사용될 수 있다.

**3. 실험 및 결과분석**

**3.1 실험장치 및 실험방법**

직접접촉식 열교환기를 실험하는데 사용한 보일



**Fig. 2** Schematic diagram of experimental apparatus

러 시스템의 개요도를 Fig. 2에 나타내었다. 실험 장치의 주요부분은 보일러(수관식 보일러 : 최대 증기발생량 0.5 t/hr)와 직접접촉식 열교환기이며, 직접접촉식 열교환기는 가스연료 연소량 8.5 Nm<sup>3</sup>/hr(충남도시가스 기준)을 기준하여 개발된 설계 프로그램을 이용하여 설계, 제작하였다.

Fig. 2에서 보는 바와 같이 보일러에 설치된 가스버너(최대 연소량 LPG 13 Nm<sup>3</sup>/hr)로 연료인 LPG와 연소용 공기가 공급되어 보일러 연소실에서 연소되어 배가스를 생성하며, 급수펌프에 의해 급수저장 탱크에 있는 물을 보일러에 공급한다. 연료인 LPG는 290 mmAq의 압력으로 가스버너에 주입되며, 공기는 가스버너에 부착된 팬을 통하여 주입된다. 보일러 연소실에서 생성된 배가스는 보일러 밖으로 나오며 이는 바로 직접접촉식 열교환기 하단으로 들어가서 열교환기 상단으로 나가 굴뚝으로 배출된다.

직접접촉식 열교환기에 공급되는 물은 또 다른 저장탱크에서 급수펌프에 의해 열교환기 상단으로 공급되며, 이 물은 상단에서 분사되어 하단으로 떨어져 밖으로 배출된다.

Fig. 3에서와 같이 직접접촉식 열교환기 (높이×내경 : 2000×304.7 mm)는 배플판(baffle plate)의 교체가 용이하도록 조립식으로 설계하였으며, 재료로는 스텔강을 사용하였다. 그러나 실제 열교환 공간은 물과 배가스가 직접 접촉하는 부분이기 때문에 높이는 1000 mm 정도가 된다. 열교환기에 사용된 배플판은 7개이나 이 또한 직접 열교환에 사용된 배플판은 5개이며, 열교환기 상단에 있는 2개의 배플판의 용도는 배가스에 의해 물방울이 빨려나가

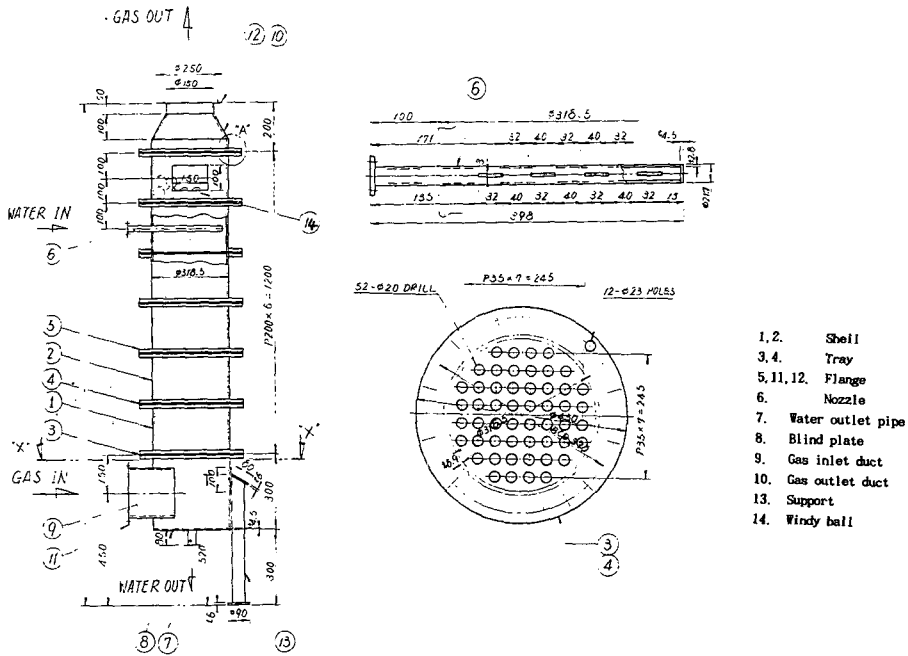


Fig. 3 Design drawings of direct contact heat exchanger

는 것을 방지키 위해 설치되었으며, 사이에는 지름 38mm의 플라스틱 윈드볼(wind ball)를 수십개 집어 넣었다.

배플판(내경×두께 : 304.7×4.5 mm)에는 사각배열로 일정하게 52개의 구멍(지름 20 mm)을 뚫었다. 재료로는 스틸강을 사용하였으며, 총 구멍단면적과 열교환기 단면적과의 비는 0.2236이다.

사용한 분무기는 튜브타입이며, 튜브 끝은 막혀 있고 튜브표면에는 120도 간격으로 한줄에 4개씩 12개의 노즐(가로 32 mm, 세로 3 mm)이 있으며, 각 노즐에서 물이 일정하게 분사되도록 설계하였다.

실험은 버너를 점화시킨 후 가스 유량계를 이용하여 원하는 연료량을 고정시키고, 이어 배가스 분석기를 이용하여 배가스에 포함되어 있는 O<sub>2</sub> 량을 측정한 후 과잉공기량을 계산하여 원하는 과잉공기량에 공기팬퍼를 고정시킨후, 3시간 정도 지나면 보일러에서 나오는 배가스의 온도가 일정하다. 이어 열교환기에 원하는 급수량을 공급하여 20~30분 정도 지나면 열교환기도 정상상태(steady state)에 도달하게 된다. 이때부터 매 5분마다 6번 각 부위별로 측정대상을 측정하여 평균값을 취한다. 연료량 및 급수량 변경시는 위에서 행한 과정을 반복하

면 된다.

Fig. 2에서는 또한 측정대상의 측정부위가 도시되어 있으며, 실험 진행순서는 문헌(9)에 자세히 기록되어 있다.

### 3.2 실험결과 및 분석

실험에 사용된 연료는 대전지방에 공급되는 LPG이며, 연료의 저위 발열량은 8,042 kcal/kg (13,816 kcal/Nm<sup>3</sup>)이며, 과잉공기량 1.0을 기준하여 배가스중에 수증기가 무게기준 10.56%나 포함되어 있다.

실험은 연료량 및 과잉공기량(배가스량 : G=119, 170, 229 kg/hr)을 일정하게 하고 급수량(100~2,000 kg/hr)을 변화시켜 실험을 행하였으며, 배가스의 열교환기 입구온도는 90~150°C, 물의 입구온도는 10~20°C 범위내에서 수행하였다.

#### (1) 열전달률

Fig. 4에서는 급수량에 따라 대류에 의한 열전달률(convection heat transfer rate), 확산에 의한 열전달률(diffusion heat transfer rate), 두값을 합친 총 열전달률(total heat transfer rate)를 보여주고 있다. 급수량이 증가함에 확산에 의한 열전달률 증가율이 대류에 의한 열전달률 증가율보다 더 크

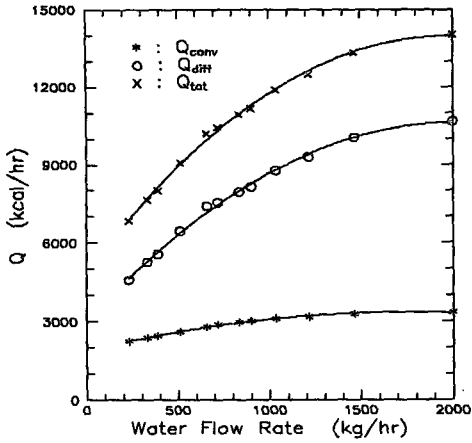


Fig. 4 Heat transfer rate(G=170 kg/hr)

게 나타나고 있다.

Fig. 5에서는 총 열전달률중 확산에 의해서 전달된 열의 비율 보여주고 있다. 배가스량이 G=119 kg/hr인 경우 확산비는 74~78% 정도가 되며, G=170 kg/hr인 경우 68~76%, G=229 kg/hr인 경우 50~66%가 된다. 배가스량이 증가함에 따라 확산비가 감소하는 이유는 배가스량이 증가하면 열용량(heat capacity) 값이 커지며, 따라서 대류에 의한 열전달률도 커지기 때문에 확산에 의해서 차지하는 비율은 그만큼 감소된다.

실험결과에서 보는바와 같이 확산에 의해서 차지하는 비가 매우 크다는 것을 알 수 있으며, 기존 공기예열기나 절단기와 같은 간접접촉식 폐열회수장치를 사용하였을 경우 이런 확산에 의한 에너지

를 회수할 수 없다. 그런데 직접접촉식 열교환기는 제작 및 운전하기가 기존 간접접촉식 폐열회수장치보다 훨씬 더 간단하여 제작비 및 운전비가 훨씬 적게 들기 때문에, 실제로 회수되어지는 에너지양보다 더 많은 에너지 절감효과를 가져올 수 있다.

(2) 열효율

열효율은 회수되어진 열량 대 입열의 비로 표현할 수 있다. 입열은 연료이외는 없기때문에 연료량에다 발열량을 곱하면 쉽게 얻을 수 있다. G=119 kg/hr인 경우 입열량은 72,997 kcal/hr, G=170 kg/hr인 경우 입열량은 102,455 kcal/hr, G=229 kg/hr인 경우 입열량은 138,065 kcal/hr가 된다.

Fig. 6~8에서 보는바와 같이 대류에 의한 열효율을 증가는 약 2~3.5%, 확산에 의해서는 4~10%이며, 두 값을 합치면 6~13.5%의 열효율 증가를 가져오고 있다. 기존 간접접촉식 열교환기를 이용 폐열을 회수하였을 경우 5% 이상의 열효율 증가를 가져오기가 힘든 반면에, 본 열교환기에서는 10% 이상도 가능하다는 실험결과가 나왔다.

참고로 국내에는 1988년말 기준 가정용 보일러를 제외한 소형 산업용 및 난방용 보일러가 3 만여대 보급되어 있으며,<sup>(10)</sup> 이들 보일러들이 본 열교환기를 이용 10%의 폐열만 회수한다고 치더라도 일년에 연료비 절감이 약 7,000억원에 이른다는 계산결과가 나온다. 이에대한 적용기준 및 산출근거를 Table 2에 자세히 기재하였다.

(3) 총괄 열전달 계수

총괄 열전달 계수(overall heat transfer coeffi-

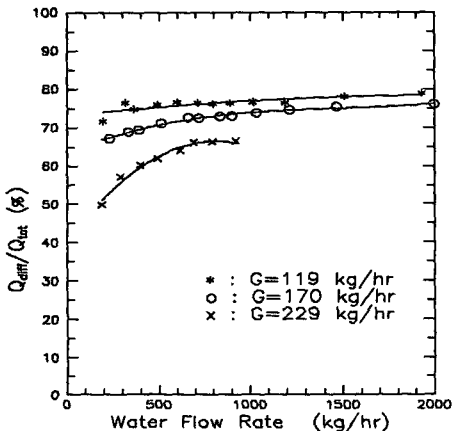


Fig. 5 The ratio of diffusion to total heat transfer rate

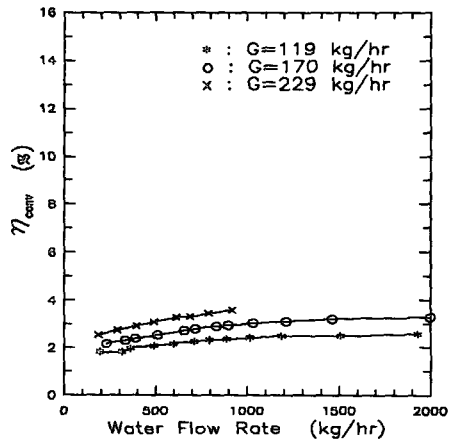


Fig. 6 Efficiency for convection heat transfer

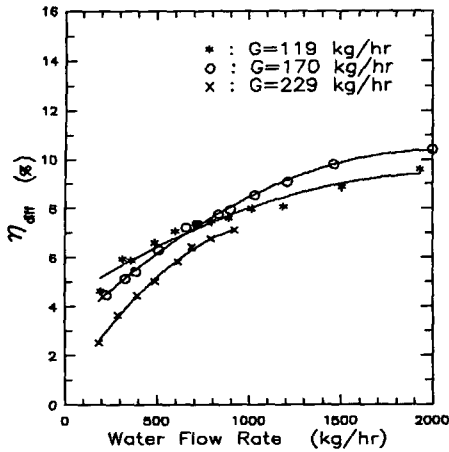


Fig. 7 Efficiency for diffusion heat transfer

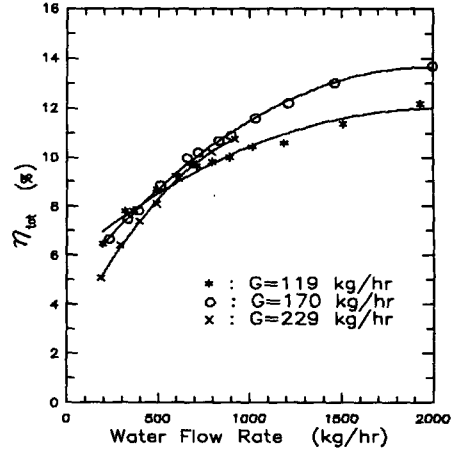


Fig. 8 Efficiency for total heat transfer rate

Table 2 The expecting conservation effect by using a direct contact heat exchanger

○ Application Standard

Boiler Capacity	: 5 t/h (average capacity of boilers installed)
Boiler Efficiency	: 85% (before installed)
Operation Load	: 80%
Yearly Operation Rate	: 80% (292d/y)
Fuel Consumption	: 340 l/h (B-C oil)
Fuel Price	: 100 won/l
Expected Conservation Rate	: 10%
Yearly Conservation Price	: 23,800,000 won/1 set
	714,000,000 won/30,000 sets

\*Calculation Bases

3041/h × (365d/y × 24h/d × 0.8) × 0.1 ≈ 238,000 l/h  
 100 won/l × 238,000 l/y ≈ 23,800,000 won/y

cient)은 다음과 같이 간단하게 구할 수 있다.

$$Q_t = U \cdot V \cdot \Delta T_{LM} \quad (1)$$

여기서  $Q_t$  (kcal/hr)는 총괄 열전달률이며,  $U$  (kcal/hr, m<sup>2</sup>, K)는 총괄 열전달 계수,  $V$  (m<sup>3</sup>)는 열교환이 이루어지는 체적이며,  $\Delta T_{LM}$  (K)은 log-mean temperature difference이다.

Fig. 9는 식(1)로부터 구해진 총괄 열전달 계수의 값을 보여주고 있다. 계수는 급수량이 증가함에 거의 선형으로 증가하고 있으며, 배가스량이 커짐에 계수의 값도 커지고 있다.

Fig. 9로부터 총괄 열전달 계수 (kcal/hr, m<sup>2</sup>, K)의 식을 구하면

$$U = 28.1872 \cdot \dot{m}_w^{0.5487} \cdot \dot{m}_g^{0.1862} \quad (2)$$

여기서  $\dot{m}_w$ 은 급수량(kg/hr)이며,  $\dot{m}_g$ 는 배가스량(kg/hr)이다.

(4) 급수의 수질

배가스량 및 배가스 입구온도를 일정하게 하고 급수량(183~1333 kg/hr)을 증가시키면서 열교환기 입·출구에서 측정된 물의 pH의 결과가 Fig. 10에서 보여지고 있다.

실험은 각각의 급수량에 5회씩 측정하여 평균값을 취하였으며, 입·출구에서 동시에 측정하였다. 입구에서 평균 pH는 7.63이며 출구에서는 약 산성인 6.12~5.99의 값을 보여주고 있다. 급수량이 증

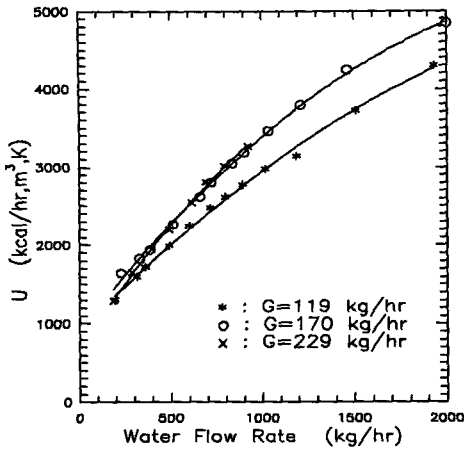


Fig. 9 Overall heat transfer coefficient

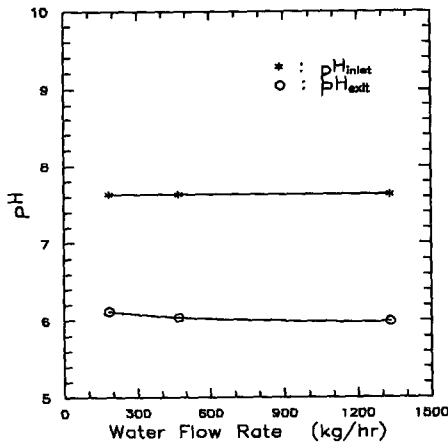


Fig. 10 Water quality

가할수록 출구에서 pH는 약간 감소함을 보여주고 있다.

따라서 직접접촉식 열교환기를 통하여 가열된 물은 산성성분이 있기 때문에 열교환기 내부재료로는 부식이 안되는 재료의 사용이 요구된다. 이 장치를 보일러 급수에열장치로 이용할 경우에는 출구에서의 물의 pH가 보일러 급수의 수질로 추천되고 있는 pH7.0 보다 낮기때문에 pH 조절을 위한 수처리 장치를 별도로 설치할 필요가 있다.

#### 4. 결 론

산업용 가스 보일러(연료량 5~11 Nm<sup>3</sup>/hr)를 이

용하여 생성된 배가스를 직접접촉식 열교환기내에서 물과 직접접촉시켜 폐열을 회수하는 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 응축은 물의 온도가 배가스 이슬점 온도보다 낮을 경우 발생하며, 급수량이 적을 경우 응축은 열교환기 상단에서 부터 일어나며, 급수량이 증가하면 그 시작점은 하단으로 이동하여 물의 출구온도가 배가스 입구 이슬점 온도보다 낮을 경우 응축은 열교환기 전지역에 걸쳐 발생한다. 본 실험에서 확산비  $Q_{diff}/Q_s$ 는 50~78%를 차지하고 있다. 이들 값들은 배가스 입구온도가 낮을수록, 배기량이 적을수록 더 커진다.

(2) 실험에서 대류에 의한 열효율 증가는 약 2~3.5%, 확산에 의해서는 4~10%, 두값을 합치면 6~13.5%의 열효율 증가를 가져왔다. 기존 간접접촉식 열교환기로는 5% 이상의 열효율 증가를 가져오기 힘든것이 현실이고 보면, 획기적인 폐열회수장치라 아니할 수 없다. 국내에서는 1988년말 기준 보일러가 3만여대 보급되어 있으며, 이들이 폐열을 10%만 회수 한다고 하면 연간 연료비 절약이 약 7000억원에 이르고 있다.

(3) 실험을 통하여 얻어진 직접접촉식 열교환기의 총괄 열전달계수 ( $U$ )가 1,300~4,900 kcal/hr, m<sup>2</sup>,K (5,500~20,500 kJ/h,m<sup>2</sup>,K) 이었으며, 이는 유럽이나, 미국에서 시판되는 직접접촉식 열교환기의 총괄 열전달계수 1,500~4,000 kcal/hr,m<sup>2</sup>,K (6,300~16,750 kJ/hr,m<sup>2</sup>,K)와 비교해볼때 실험에서 얻은 열전달 계수가 실제 설계에 매우 적합하다고 생각된다.

(4) 열교환기 출구에서 물의 pH는 6.12~5.99인 약 산성이다. 이는 보일러 급수로서 적당한 pH7.0 보다 낮기 때문에, 이 장치를 보일러 급수에열장치로 이용할 경우에는 별도의 수처리 장치가 요구된다.

#### 참고문헌

- (1) Kreith, F. and Boehm, R.F., 1988, "Direct-Contact Heat Transfer," Hemisphere Publishing Corporation.
- (2) Gas Research Institute, 1981, "Survey of Flue Gas Condensation Heat Recovery System;Executive Summary," Technical Information Services, U.S. Department of Commerce, PB83-211-888.

- (3) 박영재 외, 1986, 1987, 1989, “보일러의 집진 탈황을 겸한 폐열회수 장치,” 과학기술처 특정과제 보고서, 한국동력자원연구소.
- (4) 이병철, 1990, “중기응축용 액주식 직접접촉 열교환기의 전열특성에 관한 연구”, 석사학위논문, 인하대학교 기계공학과.
- (5) 박상일 외, 1990, “고체입자를 이용한 직접접촉 열교환기 개발 (I)”, 과학기술처 특정과제 보고서, 한국동력자원연구소.
- (6) Iciek, J., 1983, “The hydrodynamics of a Free, Liquid Jet and Their Influence on Direct Contact Heat Transfer,” *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 103, pp. 167~179.
- (7) Lee, S.Y. and Tankin, R.S., 1984, “Study of Liquid Spray in a Condensable Environment,” *Int. J. Heat & Mass Transfer*, Vol. 27, pp. 363~374.
- (8) De Salve, M., Panella, B. and Acorta, G., 1986, “Heat and Mass Transfer in Direct Contact Condensation of Steam on a Subcooled Turbulent Water Jet,” *ASHRAE*, pp. 1653~1658.
- (9) 이금배 외, 1990, “직접접촉 열교환기내에서 열전달 특성분석”, 과학기술처 기본과제 보고서, KE-90(B)-17, 한국동력자원연구소.
- (10) 이금배 외, 1989, “고효율 천연가스 보일러 기술개발 연구”, 한국가스공사 수탁과제 연구보고서, 한국동력자원연구소.