

# 보일러 내부 고온가스에 노출된 전열 튜브에서의 열유속 평가 방법

정재진\*, 송정일\*\*

\*두산중공업(주) (jaejin.jung@doosan.com), \*\*창원대학교 기계공학부(jisong@changwon.ac.kr)

## Estimation method of heat flux at tube bank exposed to high temperature flue gas in large scale coal fired boilers

Jung Jae-Jin\*, Song Jung-II\*\*

\*Doosan HeavyIndustries & Construction(jaejin.jung@doosan.com),  
\*\*Dept. of Mechanical Engineering, Changwon National University(jisong@changwon.ac.kr)

### Abstract

---

Most of the fossil power plants firing lower grade coals are challenged with maintaining good combustion conditions while maximizing generation and minimizing emissions. In many cases significant derate, availability losses and increase in unburned carbon levels can be attributed to poor combustion conditions as a result of poorly controlled local fuel and air distribution within the boiler furnace. The poor combustion conditions are directly related to the gas flow deviation in upper furnace and convection tube-bank but a less reported issue related to in large-scale opposed wall fired boilers. In order to develop a on-line combustion monitoring system and suggest an alternative heat flux estimation method at tube bank, which is very useful information for boiler design tool and soot blower optimizing system, field test was conducted at operating power boiler. During the field test the exhaust gases' temperature and tube metal temperature were monitored by using a spatially distributed sensors grid which located in the boiler's high temperature vestibule region. At these locations, the flue gas flow is still significantly stratified, and air in-leakage is minimal which enables tracing of poor combustion zones to specific burners and over-fire air ports. Test results showed that the flue gas monitoring method is more proper than metal temperature distribution monitoring for real time combustion monitoring because tube metal temp. distribution monitoring method is related to so many variables such as flue gas, internal flow unbalance, spray etc.. Heat flux estimation at tube bank with flue gas temp. and metal temp. data can be alternative method when tube drilling type sensor can't able to use.

Keywords : 보일러(Boiler), 연소(Combustion), 연소조정(Combustion tuning), 열유속(Heat flux)

---

## 기 호 설 명

$\dot{Q}$	: 열전달률
$U$	: 총괄열전달계수
$Q_R$	: 복사 열량
$Q_B$	: 튜브뱅크의 흡수열량
$h_s$	: 관내 열전달 계수
$LMTD$	: 대수평균 온도차

## 1. 서 론

석탄을 연료로 사용하는 화력 발전 보일러의 경우 미분기에 의해 분쇄된 미분탄을 화로에 투입하여 연소시키게 되며, 이때의 미분탄 연소공정은 연소자체의 복잡성은 물론 연소에 따른 슬래깅(slagging) 및 파울링(fouling) 발생과 예기치 않은 설비의 고장으로 인한 급격한 보일러 거동 변화 등 운전상대나 효율이 수시로 변화하는 아주 복잡한 시스템이다. 이러한 시스템에 대해 연소와 운전측면에서 고려하게 되는 수많은 설계인자 및 운전 변수들 중 주요 고려대상에 포함되는 것이 화로 수관벽과 튜브에서의 열유속 분포와 슬래깅/파울링발생 최소화 및 제거이다. 이와 관련하여 최근의 연구들은 수관벽이나 튜브에서의 열흡수 정도에 대한 실시간 모니터링을 통하여 최적의 운전 조건을 유지하고자하는 최적연소 시스템구현에 많은 연구들이 이뤄지고 있다. 본 연구의 목적은 이와 같이 보일러의 최적연소조건 설정에 필요한 주요 변수에 대한 실시간모니터링 실현가능성검토와 보일러 설계프로그램의 주요 영향인자중의 하나인 화로내부 튜브 뱅크에서의 열유속 평가방안을 제시하는 것이다.

## 2. 연구배경 및 관련 이론

### 2.1 연구 배경

신규 건설되는 많은 보일러들의 경우 화로의 최적성능유지를 위한 방안의 일환으로 수

관벽의 주요 부위에 온도/열유속 모니터링을 위한 열유속 센서를 설치하는 방법으로 화로의 안전성 확인과, 워터 캐년이나 월 블로우(wall blower)의 최적 작동 주기설정등에 활용하고 있으며, 튜브에 있어서는 그을음제거를 위한 슈트블로우(soot blower)를 사용함에 있어 최적의 운영을 위한 다양한 방안들이 제시되고, 도입되고 있다. 그러나 국내의 경우에는 수급되는 탄종이 다양할 뿐만 아니라 상탄되는 탄의 성상이 수시로 바뀌기 때문에 최적 슈트블로잉 구현에 많은 어려움이 있을 뿐만 아니라 도입된 최신설비의 운영도 여의치 않은 실정이다.

이와 같은 주된 이유는 최적 슈트블로잉 작동 설정에 활용되는 기본 데이터 및 계산의 불확실성 때문이기도 하다.

이러한 불확실성을 해소하는 한 방법이 아래의 1)과 같이 전열튜브에서의 금속 온도 또는 열유속을 직접 측정하는 방법이 있으나, 이와 같은 방법의 실제 적용에 있어서는 안전성의 문제에 대한 염려로 인하여 쉽게 적용되지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 실제 운전 중인 보일러를 대상으로 특정 튜브뱅크에서의 연소가스와 튜브메탈온도를 측정하는 실증시험을 통하여 운전 및 설계의 주요 변수에 대한 실시간 평가 가능성 확인과 전열튜브에서의 열유속 평가를 위한 대안을 제시하고자 하였다.

(설계프로그램시 고려하게 되는 주요 설계인자들에 대한 영향성 검토는 본 논문의 범위를 벗어나므로 논의하지 않기로 한다.)

### 1) 열전대를 튜브 내부에 삽입하는 방법

이 방법은 튜브 두께방향의 중간지점까지 열전대를 삽입할 수 있는 구멍을 낸 후, 하나 또는 일정간격을 둔 두 개의 열전대를 삽입하는 방법으로써 튜브 mid-wall temp.나 열유속을 직접 측정할 수 있는 가장 확실한 방법이다. 그러나 적용시의 안전성에 대한 우려 및 만일의 사고에 대한 불안요인 때문에 적용을 꺼려하는 방법이다.

## 2.2 관련이론

열은 상호작용하는 시스템들 사이의 온도 차에 의해 유발되는 에너지 전달이며, 열전달의 목적은 두 온도의 차이가 두 시스템 사이의 열전달률의 크기를 지배하는 방법을 명확하게 서술하는데 있다. 이와 같은 서술은 두 시스템 사이의 열전달률의 크기가 다름에 의해서뿐만 아니라 열교환이 일어나는 대상물의 물리적 형상에 의해서도 영향을 받으므로 아주 복잡하게 될 수 있으며, 다음과 같은 하나의 식으로 합축하여 나타낼 수 있다.

$$\dot{Q} = f(\text{온도차, 시간, 열물리적 특성, 형상, 유동})$$

다음의 식들은 실증시험을 통하여 취득한 연소가스 온도 및 튜브에서의 측정온도를 이용하여 특정 구간에서의 열유속 평가와 튜브뱅크에서의 열전달 및 에너지 균형을 위한 지배방정식을 나타내고 있다.

연소가스로부터 튜브로 전달된 열전달은 다음과 같은 대수평균온도차를 이용한 식에 의해 구할 수 있다.

$$Q_G(kW) = U \cdot A \cdot F_C \cdot LMTD$$

식에서,

$$Q_G(kW) = \text{가스에 의해 튜브뱅크와 주벽으로 빼앗긴 총 열량}$$

$$U(W/m^2C) = \text{총괄열전달계수}$$

$$A(m^2) = \text{튜브 뱅크표면적(주벽 포함)}$$

$$LMTD = \text{대수평균온도차}$$

$$F_C = \text{직교흐름계수를 나타낸다.}$$

튜브 뱅크내에서는 국부적으로 튜브내부의 유체에 대해 열전달이 이뤄지는 것과 함께 상류와 하류 캐비티(cavity)로부터 복사열을 받게 되며, 이때의 열평형은 다음과 같이

$$Q_B = Q_G + Q_R$$

와 같이 나타낼 수 있고,

$$Q_G = \text{가스에 의한 열손실,}$$

$$Q_R = \text{인접한 캐비티나 화로로부터 복사에 의해 흡수한 열량이다.}$$

총괄열전달계수는 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{F \cdot (U_C + U_R)} + \frac{1}{U_0} + \frac{1}{U_m} + \frac{1}{U_i} + \frac{1}{U_s}$$

식에서,

$$U_C(W/m^2C) = \text{가스측 대류열전달계수}$$

$$U_R(W/m^2C) = \text{튜브간 복사열전달계수}$$

$$F = \text{전체 가스측 열전달에 적용되는 계수}$$

$$U_O(W/m^2C) = \text{튜브표면 퇴적물의 전도}$$

$$U_m(W/m^2C) = \text{튜브메탈 전도}$$

$$U_i(W/m^2C) = \text{튜브내면 퇴적물의 전도}$$

$$U_s(W/m^2C) = \text{튜브내부 유체열전달계수}$$

를 나타내며, 각각의 계수들은 다음과 같이 간략히 나타낼 수 있다.

1) 가스측 대류열전달계수 :  $U_C$

$$U_C = Kf \cdot F_A \cdot F_D \cdot F_x \cdot F_d \cdot U'_C$$

식에서,

$$Kf = \text{뱅크 성능계수, } F_A = \text{배열계수}$$

$$F_D = \text{깊이 계수, } F_x = \text{질량유속계수}$$

$$F_d = \text{지름보정계수,}$$

$$U'_C = \text{기본 전도계수이다.}$$

2) 튜브외면 퇴적물전도계수 :  $U_O$

$$U_O = 1,000 K_o/x_o$$

위식에서,

$$K_o = \text{튜브내면온도에 대한 외부퇴적물의 열전도율}$$

$$x_o = \text{퇴적물 두께를 나타내며,}$$

3) 튜브 메탈 전도성 :  $U_m$

$$U_m = 1,000 K_m / t_e$$

여기서,

$K_m$  = 평균 튜브온도에서의 열전도율

$t_e$  = 튜브의 등가 두께

$$= \frac{D_o}{2} \log_e(D_o/D_i) \text{이다.}$$

4) 튜브내면 퇴적물전도계수 :  $U_i$

$$U_i = 1,000 K_i / x_i$$

3)항과 유사한 개념으로,,

$K_i$  = 튜브내면온도에 대한 내부퇴적물의 열전도율

$x_i$  = 퇴적물 두께를 나타낸다.

5) 튜브내부 유체의 열전달계수

$$U_s = h_s D_i / D_o$$

식에서,

$h_s$ 는 유체의 상태에 따라 달라지며, 다음과 같은 식(extended Lis and Kellard correlation)에 의해 구할 수 있다.

$$h_s = \frac{N_U \cdot k}{d}$$

위식에서,

$$N_U = 0.00925 \cdot Re^{0.871} \cdot Pr \cdot (V_i/V_b)^{0.139}$$

$$Re = G \cdot d / \mu, Pr = C_p \cdot \mu / k \text{이며,}$$

이는 다시 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h_s = 0.00925 \cdot G^{0.871} / d^{0.129} \cdot C_p \cdot \mu^{0.129} (V_b/V_i)^{-0.139}$$

이와 함께 튜브간의 기본 복사전도를 계산하기 위해 필요한 튜브 표면온도의 계산은 다음과 같이 계산된다. 즉, 튜브내부의 체적온도에 튜브내면의 열전달에 따른 온도강하와 내부표면의 오염, 튜브의 두께 및 외부표면의 오염정도를 고려한 온도 강하를 고려함으로써 구할 수 있다.

$$T_{surface} = T_i + \Delta t_f + \Delta t_i + \Delta t_m + \Delta t_o$$

여기서,

$T_i$  = 튜브내부유체의 체적온도

$\Delta t_f$  = 튜브내부 대류열전달에 따른 온도 강하

$\Delta t_i$  = 튜브내부 스케일에 의한 온도 강하

$\Delta t_m$  = 튜브의 두께에 따른 열전도에 의한 온도 강하

$\Delta t_o$  = 튜브외부 퇴적물에 의한 온도 강하

이다. 이와 같은 식들은 전열면에서의 열전달계산 즉, 후부 전열부의 전열면적 결정과 같은 성능설계에 가장 밀접한 관계가 있는 지배방정식이다. 가스에서 증기로 열이 전달되는 경우 전달되는 열량에 영향을 미치는 인자에 대한 계산을 할 경우 불휘염 복사에 관계되는 인자들은 가스온도, 가스성분, 전열면의 배치들이기 때문에 충분한 정확성을 가지고 예측할 수 있는 값이지만, 대류 열전달의 경우 가스유속분포가 영향을 미치므로 훨씬 예측하기 힘들다. 따라서 대부분의 보일러 제작사들은 이와 같은 실험이나 많은 운전실적 데이터를 통하여 제작사 고유의 대류 열전달량을 예측하는 방법을 확보하고 있으며, 문헌에서 볼 수 있는 식은 기본적인 식의 형식을 제공할 수 있지만 직접 설계에 적용하는데 한계가 있다.

### 3. 실증시험 방법 및 결과

#### 3.1 실증시험 설비 개요

실증시험 대상 보일러는 변압운전용 초임계압 관류보일러로서 화로(furnace) 하부는 나선형(helical)구조이고 화로상부는 수직노벽(vertical wall)이며, 화로 상부의 방사영역에 2차과열기, 노우즈(nose) 상부에 3차과열기, 화로 스크린 튜브 후부의 수평흐름영역(vestibule zone)에 최종과열기와 최종재열기가 순차적으로 위치한다. 후부전열부에는 앞쪽에 일차재열기, 뒷편에 일차과열기와 절탄기(economizer)가 배치되며, 각 가스통로(gas pass) 출구에는 제어템퍼가 위치하며 재열기온도를 조절할 수 있도록 되어 있다.

표 1. 실증시험대상 설비 주요사항

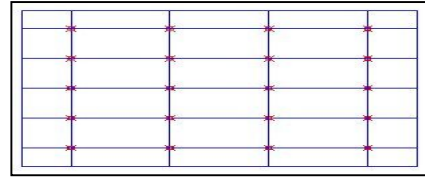
항목	사항
보일러 형식	초임계압,관류형
증발량	1,690 t/h
재열 증발량	1,394 t/h
과열기출구 증기압력	255 kg/cm <sup>2</sup> g
재열기출구 증기압력	41.6 kg/cm <sup>2</sup> g
과열기출구 증기온도	541 °C
재열기출구 증기온도	541 °C
절탄기입구 급수온도	287 °C
통풍 방식	평형 통풍
사용 연료	석탄, B-C Oil
※ 증발량, 증기온도, 증기압력 : BMCR	

### 3.2 센서 설치

센서의 설치는 그림 2와 같이 화로 상부의 수평흐름영역에 위치한 최종과열기를 대상으로 연소가스의 흐름에 수직한 면에 5 X 4의 공간격자를 형성한 후 각각의 절점에 연소가스와 튜브의 메탈온도를 동시에 측정할 수 있는 열전대를 취부 하였다. 또한 폭방향의 4개 Assembly 중 첫 번째 튜브열에 대해서는 각 측정 대상 튜브에 대해 입구에서 출구까지 구간별 온도 변화 상태를 확인할 수 열전대를 설치하였다.



(a) Tube Element 센서 설치 위치



(b) 센서 격자(Location B)

그림 1. 센서 격자 및 설치위치

### 3.2 실증시험 결과 및 고찰

측정된 데이터의 평가를 위해 그림 2와 같이 부하가 안정된 특정구간에 대해 데이터를 샘플링한 후 이들의 평균값을 데이터 분석에 활용하였다.

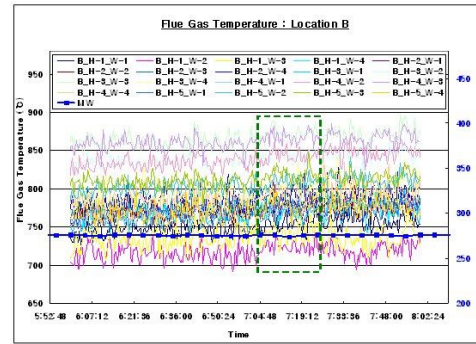
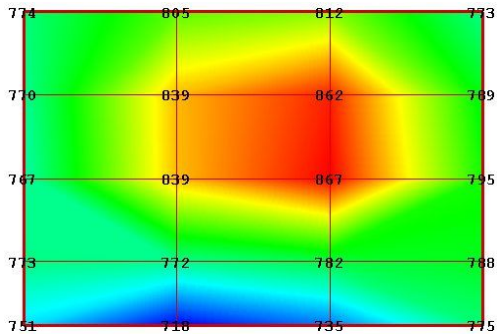


그림 2. 측정데이터 샘플링 구간

#### 1) 연소가스 측정 및 메탈온도 측정

그림 3은 Location (B)에서 측정된 연소가스 온도분포를 나타내고 있다. 이와 같은 연소가스 온도 분포는 상탄되는 탄종, 운전조건의 변화에 따라 가스온도분포가 바뀌게 됨을 확인할 수 있었으며, 특정 조절 변수에 대한 영향시험결과 실시간 반응과 함께 재현성을 갖고 있음을 확인하였다. 최적연소의 경우 버너단에서 해결하는 방법이 가장 좋은 방법이지만 연소 자체의 복잡성 때문에 이론적으로 예상되는 결과를 얻기란 쉽지가 않은게 현실이다. 이 같은 경우 연소가스 성분이나 온도에 대한 실시간 모니터링의 경우 실시간으로 연소상태를 확인할 수 있기 때문에 상탄되는 연료나 운전조건이 수시로 바뀌는

환경에서의 연소조정에 유용하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.



(Reference only : radiation effect not considered)  
그림 3. Flue gas contour plot(275MW)

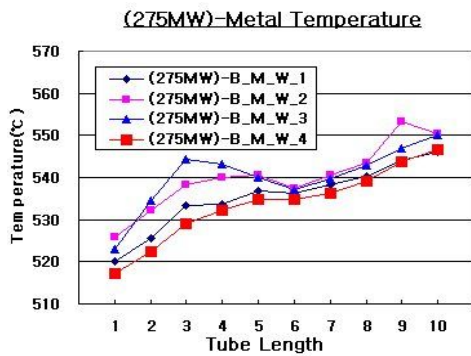


그림 4. Metal Temp. Trend (275MW)

그림 4는 그림 1의 (a)와 같이 하나의 튜브 열 전체 길이에 대한 메탈온도 분포를 나타내고 있으며, 그림 3의 연소 가스온도 분포의 고온 영역과는 밀접한 관계를 갖고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 메탈온도 측정결과와 2.2의 식을 이용하여 튜브내부의 유체 온도를 계산하고 각 측정지점에서의 엔탈피를 구하게 되면 특정 구간에서의 열유속을 구할 수 있게 된다. 따라서 설계프로그램 개선이나 슈트블로우 최적운전을 위한 실시간 열유속 모니터링의 경우 튜브내부에 열전대를 직접 삽입하여 측정하는 직접법의 적용이 여의치 않을 경우에 대한 대안으로 활용할 수 있을 것이다.

#### 4. 결 론

본 연구는 보일러의 최적연소조건 설정에 필요한 주요 변수에 대한 실시간모니터링 실현가능성검토와 슈트블로우최적화이나 설계프로그램의 주요 영향인자중의 하나인 화로 내부 튜브 뱅크에서의 열유속 평가방안을 제시하는 것으로서 운전중인 발전소의 보일러를 대상으로 수행한 각종 실증시험 결과의 일부이며 결론은 다음과 같다.

- (1) 연소가스 온도 모니터링의 경우 운전조건의 변화에 따라 가스온도분포가 바뀌게 됨을 확인할 수 있었으며, 특정 조절 변수에 대한 영향시험결과 실시간 반응과 함께 재현성을 갖고 있음을 확인하였다.
- (2) 메탈 온도 모니터링의 경우 센서의 내구성 측면에서는 유리한 점이 있으나, 측정결과에 영향을 미치는 인자들이 많기 때문에 연소상태 모니터링용으로는 부적당할 것으로 판단된다.
- (3) 연소가스온도와 메탈온도측정 결과를 이용한 튜브 특정 구간에서의 열유속 평가는 튜브에 삽입하는 타입의 센서 적용이 어려울 경우 그 대안으로 활용할 수 있음을 알았으며, 나아가 실험용이 아닌 실제 적용시에는 튜브 내면이 아닌 외면에 한 쌍의 센서를 취부하고, 결과를 평가할 경우 큰 오차 없이 튜브의 mid-wall 온도나 열유속 데이터를 확보할 수 있을 것이다.

#### 참 고 문 헌

1. The Babcock&Wilcox, a McDermott Co., "Steam/its generation and use. 41st edition," 2005
2. Storm, R.F. and Reilly, T.J., "Coal Fired Boiler Performance Improvement Through Combustion Optimization," ASME paper 87-JPGC-Pwr-6, 1987